Welt im Wandel

Wissenschaftlicher Beirat
der Bundesregierung
Globale
Umweltveränderungen

Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung

Arbeitsexemplar
Bundesregierung

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen
Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung

Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen

(Stand: 31. Oktober 2008)

Prof. Dr. Renate Schubert (Vorsitzende), Ökonomin
Direktorin des Instituts für Umweltentscheidungen an der ETH Zürich, Schweiz

Prof. Dr. Hans Joachim Schellnhuber CBE (stellv. Vorsitzender), Physiker
Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung und Gastprofessor an der Universität Oxford (Fachbereich Physik und Christ Church College)

Prof. Dr. Nina Buchmann, Ökologin
Professorin für Graslandwissenschaften an der ETH Zürich, Schweiz

Prof. Dr. Astrid Epiney, Juristin
Direktorin am Institut für Europarecht der Universität Fribourg, Schweiz

Dr. Rainer Grießhammer, Chemiker
Mitglied der Geschäftsführung des Öko-Instituts e.V., Freiburg

Prof. Dr. Margareta E. Kulessa, Ökonomin
Professorin für Allgemeine Volkswirtschaftslehre und Internationale Wirtschaftsbeziehungen an der Fachhochschule Mainz

Prof. Dr. Dirk Messner, Politikwissenschaftler
Direktor des Deutschen Instituts für Entwicklungspolitik, Bonn und Professor für Politikwissenschaft an der Universität Duisburg-Essen

Prof. Dr. Stefan Rahmstorf, Physiker
Leiter der Abteilung Klimasystem am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Professor für Physik der Ozeane an der Universität Potsdam

Prof. Dr. Jürgen Schmid, Ingenieur für Luft- und Raumfahrttechnik
Vorstandsvorsitzender und wissenschaftlicher Leiter des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik, Kassel und Professor für Elektrotechnik/Informatik an der Universität Kassel

WBGU

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen

Welt im Wandel:

Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung

mit 72 Abbildungen

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen (WBGU)
Geschäftsstelle
Reichpietschufer 60–62
10785 Berlin

Tel.: 030 263948 0
Fax: 030 263948 50
Email: wbgu@wbgu.de
Web: http://www.wbgu.de

Diese Fassung wird weiter bearbeitet! Stand: 02.12.2008

Das endgültig redigierte Gutachten wird als Vierfarbdruck im Frühjahr 2009 im Eigenverlag des WBGU erscheinen.

© WBGU, 2008

Mitarbeiter des Beirats und Danksagung

Dieses Gutachten beruht auch auf der sachkundigen und engagierten Arbeit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Geschäftsstelle sowie bei den Beiratsmitgliedern.

Wissenschaftlicher Stab der Geschäftsstelle

Prof. Dr. Meinhard Schulz-Baldes
(Generalsekretär)

Dr. Carsten Loose
(Stellvertretender Generalsekretär)

Dr. Karin Boschert

Dr. Oliver Deke

Dipl.-Umweltwiss. Tim Hasler

Dr. Nina V. Michaelis

Dr. Benno Pilardeaux
(Medien- und Öffentlichkeitsarbeit)

Dr. Astrid Schulz

Sachbearbeitung, Lektorat und Sekretariat in der Geschäftsstelle

Vesna Karic-Fazlic (Sachbearbeitung Finanzen)

Martina Schneider-Kremer, M.A. (Lektorat)

Margot Weiß (Sekretariat)

Wissenschaftliche Mitarbeiter der Beiratsmitglieder

Dipl.-Phys. Jochen Bard (Institut für Solare Energieversorgungstechnik, ISET Kassel, bis 01.07.2007)

Steffen Bauer, MA (Deutsches Institut für Entwicklungspolitik, DIE Bonn)

Dipl.-Volksw. Julia E. Blasch (Institut für Umweltentscheidungen, ETH Zürich)

Dr. Georg Feulner (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, PIK e.V.)

Dr. Sabina Keller (ETH Zürich)

Dipl.-Geogr. Andreas Manhart (Öko-Institut e.V., Freiburg, bis 30.04.2008)

Dipl.-Volksw. Markus Ohndorf (ETH Zürich)

Dr. Martin Scheyli (Universität Fribourg, Schweiz)

M. Sc. Dipl.-Ing. Michael Sterner (Institut für Solare Energieversorgungstechnik, ISET Kassel, ab 01.07.2007)

Dr. Ingeborg Schinninger (ETH Zürich, bis 31.05.2007)

Dr. Jennifer Teufel (Öko-Institut e.V., Freiburg, ab 01.05.2008)

Den externen Gutachtern dankt der Beirat für die Zuarbeit und wertvolle Hilfe. Im Einzelnen flossen folgende Expertisen und Stellungnahmen in das Gutachten ein:

- Dipl.-Umweltwiss. Tim Beringer, Prof. Wolfgang Lucht (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, PIK e.V.): „Simulation nachhaltiger Bioenergiepotentiale“.
- Dr. Göran Berndes (Department of Energy and Environment, Physical Resource Theory, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden): „Water demand for global bioenergy production: trends, risks and opportunities“.
- Dr. André Faaij (Utrecht University, Copernicus Institute): „Bioenergy and global food security“.
- Dr. Uwe R. Fritsche, Kirsten Wiegmann (Öko-Institut, Büro Darmstadt): „Treibhausgasbilanzen und kumulierter Primärenergieverbrauch von Bioenergie-Konversionspfaden unter Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen“).
- Dr. Les Levidow, PhD (The Open University, Development Policy and Practice (DPP) Group, Milton Keynes, UK), Helena Paul (EcoNexus, Oxford, UK): „Land-use, Bioenergy and Agro-biotechnology“.
- Dipl.-Ing. Franziska Müller-Langer, Anastasios Perimenis, Sebastian Brauer, Daniela Thrän, Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt (Deutsches BiomasseForschungsZentrum – DBFZ, Leipzig): „Technische und ökonomische Bewertung von Bioenergie-Konversionspfaden“.
- Mark W. Rosegrant, Anthony J. Cavalieri (International Food Policy Research Institute – IFPRI, Washington, DC): „Bioenergy and Agro-biotechnology“.
- Mark W. Rosegrant, Mandy Ewing, Siwa Msangi, und Tingju Zhu (International Food Policy Research Institute – IFPRI, Washington, DC): „Bioenergy and Global Food Situation until 2020/2050“.
- Dr. Ingeborg Schinninger (ETH Zürich, Institut für Pflanzenwissenschaften): „Globale Landnutzung“.
- Dr. oec. troph. Karl von Koerber, Dipl. oec. troph. Jürgen Kretschmer, Dipl. oec. troph. Stefanie Prinz (Beratungsbüro für Ernährungsökologie, München): „Globale Ernährungsgewohnheiten und -trends“.

Für die Unterstützung bei der Erstellung von Grafiken danken wir Danny Rothe, Design Werbung Druck, Berlin.

Wertvolle Anregungen bekam der Beirat während seiner Intensivtagung im Mai 2008 in Schmöckwitz durch die Vorträge zu „THG-Emission Bio-Prozesse mit LUC“ von Dr. Uwe R. Fritsche (Öko-Institut, Büro Darmstadt) und zur „Technischen und ökonomischen Bewertung von Bioenergiekonversionspfaden“ von Dipl.-Ing. Franziska Müller-Langer (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig). Auch Herrn Tim Beringer (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, PIK e.V.) danken wir für die Vorstellung der Ergebnisse seiner „Modellierung zu nachhaltigem globalen Bioenergiepotenzial“.

Danken möchte der Beirat auch jenen Personen, die durch Gespräche, Kommentare, Beratung, Recherche oder den Review einzelner Teile des Gutachtens der Arbeit des Beirats wertvolle Dienste erwiesen haben:

Prof. Dr. Markus Antonietti (Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam); Verena Brinkmann (Sector Project HERA – Household Energy Programme, GTZ Eschborn); Qays Hamad, Advisor to the Executive Director for Germany (The World Bank, Washington, DC); DirProf. Dr. Christian Hey und Dr. Susan Krohn (Sachverständigenrat für Umweltfragen – SRU, Berlin); Philipp Mensch (ETH Zürich); Gregor Meerganz von Medeazza, PhD (Sustainable Energy and Climate Change Initiative – SECCI, Washington, DC); Ritah Mubbala (Institut für Solare Energieversorgung – ISET, Kassel); Dr. Alexander Popp (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, PIK e.V.); Dr. Timothy Searchinger (Princeton University, Princeton, NJ); Dr. Karl-Heinz Stecher (KfW Bankengruppe, Berlin) sowie Dr. Tilman Altenburg, Dr. Michael Brüntrup, Dr. Matthias Krause, Christian von Drachenfels, Dipl.-Ing. agr. Heike Höffler, Julia Holzbach und Kathrin Seelige (Deutsches Institut für Entwicklungspolitik – DIE, Bonn).

Der WBGU möchte sich überdies herzlich bei den Organisatoren und Gesprächspartnern während der Studienreise nach Indien vom 5. bis 17. Februar 2008 bedanken. Die Reise wurde mit großer inhaltlicher und organisatorischer Unterstützung der Deutschen Botschaft in New Delhi durchgeführt. Der Beirat möchte sich bei Herrn Botschafter Mützelburg und allen Mitarbeitern herzlich für die wertvolle Unterstützung bedanken. Ein besonderer Dank geht an Herrn Dr. von Münchow-Pohl und Frau Subhedar, die die verschiedenen Stationen der Reise geplant und Gesprächspartner gefunden haben. Ein Dank geht auch an Frau Holzhauser, Herrn Wirth und Frau Tiemann, die den WBGU zu Terminen in Delhi begleitet haben. Bedanken möchten wir uns außerdem beim Team der GTZ, Frau Kashyap, Herr Glück, Herr Dr. Bischoff, Herr Dr. Porst und Herr Babu.

Viele Experten vor Ort aus Politik, Verwaltung und Wissenschaft haben für den Beirat Führungen, Vorträge und Präsentationen vorbereitet und standen für Diskussionen und Gespräche zur Verfügung. Ihnen allen gilt der persönliche Dank des Beirats.

Inhaltsübersicht

Mitarbeiter des Beirats und Danksagung ..... **V**

Inhaltsübersicht ..... **VII**

Inhaltsverzeichnis ..... **IX**

Kästen ..... **XVII**

Tabellen ..... **XIX**

Abbildungen ..... **XXI**

Akronyme ..... **XXIV**

Zusammenfassung für Entscheidungsträger **1**

1 Einleitung **21**

2 Motivationen für die Nutzung von Bioenergie **23**

2.1 Aktuelle Diskurse um Bioenergie 23
2.2 Bioenergie im Kontext nachhaltiger globaler Energie- und Landnutzungssysteme 25

3 Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Bioenergie **29**

3.1 Ökologische Nachhaltigkeit 29
3.2 Sozioökonomische Nachhaltigkeit 32
3.3 Fazit 34

4 Bioenergie, Landnutzung und Energiesysteme: Status Quo und Trends **35**

4.1 Bioenergie in den globalen Energiesystemen 35
4.2 Globale Landbedeckung und Landnutzung 50

5 Nutzungskonkurrenzen **61**

5.1 Einleitung 61
5.2 Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion 61
5.3 Stoffliche Nutzung von Biomasse 75
5.4 Nutzungskonkurrenz zur biologischen Vielfalt 79
5.5 Landnutzungsoptionen für den Klimaschutz 87
5.6 Nutzungskonkurrenz um Boden und Wasser 95

6 Modellierung des globalen Potenzials von Energiepflanzen ... 101

6.1 Bisherige Abschätzungen zum Potenzial der Bioenergie ... 101
6.2 Globale Landnutzungsmodelle: Stand der Wissenschaft ... 106
6.3 Beschreibung des Modells ... 106
6.4 Modellannahmen und Szenarien ... 109
6.5 Ergebnisse ... 116
6.6 Wichtigste Unsicherheiten der Modellierung ... 128
6.7 Regionale Betrachtung ... 130
6.8 Interpretation ... 136

7 Anbau und energetische Nutzung von Biomasse ... 139

7.1 Anbausysteme zur Produktion von Biomasse für Energiezwecke ... 139
7.2 Technisch-ökonomische Analyse und Bewertung von Bioenergienutzungspfaden ... 158
7.3 Treibhausgasbilanzen ... 178

8 Optimale Einbindung und Nutzung der Bioenergie in Energiesystemen ... 197

8.1 Bioenergie als Teil einer nachhaltigen Energieversorgung in Industrieländern ... 197
8.2 Bioenergie als Teil einer nachhaltigen Energieversorgung in Entwicklungsländern ... 210

9 Nachhaltige Produktion von Biomasse und Nutzung von Bioenergie: Synthese ... 219

9.1 Nachhaltige Produktion von Biomasse für die energetische Nutzung: Was ist zu beachten? ... 219
9.2 Wandlung, Anwendung und Einbindung von Bioenergie – Nutzung von Bioenergie ... 220

10 Globale Bioenergiepolitik ... 229

10.1 Einleitung ... 229
10.2 Internationale Klimapolitik ... 230
10.3 Standards für die Produktion von Bioenergieträgern ... 244
10.4 Ansätze zur Sicherung der Welternährung im Rahmen einer nachhaltigen Bioenergiepolitik 264
10.5 Internationale Biodiversitätspolitik und nachhaltige Bioenergie ... 275
10.6 Wasser- und Bodenschutz im Kontext einer nachhaltigen Bioenergiepolitik ... 285
10.7 Staatliche Förderung der Bioenergie: Agrar- und industriepolitische Maßnahmen ... 288
10.8 Bioenergie und Entwicklungszusammenarbeit ... 301

11 Forschungsempfehlungen ... 319

11.1 Bioenergienutzung und Klimabilanz ... 319
11.2 Nachhaltige Potenziale für Bioenergie ... 321
11.3 Bioenergie und Energiesysteme (modern, traditionell) ... 324
11.4 Bioenergie und globales Landnutzungsmanagement ... 327
11.5 Gestaltung internationaler Bioenergiepolitik ... 329

12 Handlungsempfehlungen ... 333

12.1 Bioenergie konsistent in die internationale Klimaschutzpolitik einbinden ... 334
12.2 Standards und Zertifizierung für Bioenergie und nachhaltige Landnutzung einführen ... 336
12.3 Nutzungskonkurrenzen nachhaltig regulieren ... 339
12.4 Förderpolitiken für Bioenergie gezielt einsetzen ... 343
12.5 Nachhaltiges Bioenergiepotenzial in Entwicklungs- und Schwellenländern nutzen ... 347
12.6 Strukturen für eine nachhaltige globale Bioenergiepolitik schaffen ... 349

13 Literatur ... 353

Inhaltsverzeichnis

Mitarbeiter des Beirats und Danksagung ..... **V**

Inhaltsübersicht ..... **VII**

Inhaltsverzeichnis ..... **IX**

Kästen ..... **XVII**

Tabellen ..... **XIX**

Abbildungen ..... **XXI**

Akronyme ..... **XXIV**

Zusammenfassung für Entscheidungsträger **1**

1 Einleitung **21**

2.1 Aktuelle Diskurse um Bioenergie **23**

2 Motivationen für die Nutzung von Bioenergie **23**

2.2 Bioenergie im Kontext nachhaltiger globaler Energie- und Landnutzungssysteme **25**
2.2.1 Bioenergie, Energiewende und Klimaschutz 26
2.2.2 Bioenergie, Energiewende und Energiearmut 26
2.2.3 Spezifische Eigenschaften von Biomasse 26

3 Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Bioenergie **29**

3.1 Ökologische Nachhaltigkeit **29**
3.1.1 Leitplanke für den Klimaschutz 29
3.1.2 Leitplanke für den Biosphärenschutz 30
3.1.3 Leitplanke für den Bodenschutz 30
3.1.4 Weitere ökologische Nachhaltigkeitsanforderungen 31

3.2 Sozioökonomische Nachhaltigkeit **32**
3.2.1 Leitplanke zur Sicherung des Zugangs zu ausreichend Nahrung 32
3.2.2 Leitplanke zur Sicherung des Zugangs zu modernen Energiedienstleistungen 33
3.2.3 Leitplanke zur Vermeidung von Gesundheitsschäden durch Energienutzung 33
3.2.4 Weitere sozioökonomische Nachhaltigkeitsanforderungen 33

3.3 Fazit **34**

4 Bioenergie, Landnutzung und Energiesysteme: Status Quo und Trends ... 35

4.1 Bioenergie in den globalen Energiesystemen ... 35
4.1.1 Aktuelle Bioenergienutzung – Stand und Trends ... 35
4.1.1.1 Bioenergie im globalen Energiesystem ... 35
4.1.1.2 Nutzung von Biowärme und -strom im Energiesystem ... 37
4.1.1.3 Nutzung von Biokraftstoffen ... 39
4.1.2 Aktuelle Bioenergieförderpolitik ... 43

4.2 Globale Landbedeckung und Landnutzung ... 50
4.2.1 Die globale Landbedeckung ... 50
4.2.2 Die globale Landnutzung ... 53
4.2.3 Der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf Ökosystemleistungen ... 55
4.2.3.1 Konversion von Wald ... 55
4.2.3.2 Konversion von Feuchtgebieten ... 57
4.2.3.3 Konversion von Grasland ... 57
4.2.3.4 Konversion von Ackerflächen ... 59
4.2.4 Zusammenfassende Bewertung ... 59

5 Nutzungskonkurrenzen ... 61

5.1 Einleitung ... 61

5.2 Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion ... 61

5.2.1 Einleitung ... 61
5.2.2 Steigendes Angebot und Nachfrage nach Nahrung ... 62
5.2.3 Änderung von Ernährungsgewohnheiten als Herausforderung ... 63
5.2.3.1 Einzelne Nahrungsmittel im Überblick: Globale Trends ... 63
5.2.3.2 Flächenbedarf von Ernährungsgewohnheiten und Nahrungsmitteln ... 64
5.2.3.3 Zusätzlicher Flächenbedarf durch Wandel der Ernährungsweise ... 66
5.2.4 Grenzen für die Potenziale der Nahrungsproduktion ... 67
5.2.4.1 Flächenpotenziale und Bodendegradation ... 67
5.2.4.2 Einfluss des Klimawandels auf Produktionspotenziale ... 67
5.2.5 Wirkungen des Bioenergiebooms auf die Ernährungssicherheit ... 68
5.2.5.1 Die vier Dimensionen der Ernährungssicherheit ... 68
5.2.5.2 Der Einfluss des Bioenergiebooms auf Preise und Einkommen ... 69
5.2.6 Fazit: Ansätze zur Entschärfung der Nutzungskonkurrenzen ... 75

5.3 Stoffliche Nutzung von Biomasse ... 75
5.3.1 Stoffliche Nutzung von pflanzlichen Rohstoffen (außer Holz) in Deutschland ... 76
5.3.2 Stoffliche Nutzung von Forstprodukten ... 77
5.3.3 Kaskaden-Nutzung ... 78
5.3.4 Perspektiven der stofflichen Produktion ohne Öl, Gas und Kohle ... 79

5.4 Nutzungskonkurrenz zur biologischen Vielfalt ... 79
5.4.1 Konkurrenz des Energiepflanzenanbaus mit bestehenden Schutzgebieten ... 81
5.4.2 Konkurrenz des Bioenergieanbaus mit natürlichen Ökosystemen außerhalb von Schutzgebieten ... 82
5.4.3 Konkurrenz des Bioenergieanbaus mit der Erhaltung biologischer Vielfalt in Kulturlandschaften ... 84
5.4.4 Querschnittsproblem Klimawandel ... 86
5.4.5 Folgerungen ... 87

5.5 Landnutzungsoptionen für den Klimaschutz ... 87
5.5.1 Wälder und Klimaschutz ... 87

5.5.1.1 Vermeidung von Entwaldung und Degradation von Wäldern ... 87
5.5.1.2 Aufforstung ... 89
5.5.1.3 Forstmanagement, nachhaltige Forstwirtschaft ... 90
5.5.2 Landwirtschaft und Klimaschutz ... 91
5.5.3 Klimaschutz durch Nutzung langlebiger Biomasseprodukte ... 92
5.5.4 Schlussfolgerungen ... 93

5.6 Nutzungskonkurrenz um Boden und Wasser ... 95
5.6.1 Bodendegradation und Desertifikation ... 95
5.6.2 Übernutzung von Süßwasserressourcen ... 96
5.6.3 Fazit: Energiepflanzenanbau in nachhaltiges Boden- und Wassermanagement integrieren ... 98

6 Modellierung des globalen Potenzials von Energiepflanzen ... 101

6.1 Bisherige Abschätzungen zum Potenzial der Bioenergie ... 101
6.1.1 Bioenergiepotenziale in der neueren Literatur ... 101
6.1.2 Zusammenfassung und Bewertung ... 104

6.2 Globale Landnutzungsmodelle: Stand der Wissenschaft ... 106
6.2.1 Auswirkungen und Einflussfaktoren menschlicher Landnutzung ... 106
6.2.2 Typen von globalen Modellen von Landnutzung und Landnutzungsänderung ... 106

6.3 Beschreibung des Modells ... 106
6.3.1 Im Modell verwendete Methoden ... 107
6.3.1.1 Modellierung der pflanzlichen Produktivität ... 107
6.3.1.2 Landwirtschaft in LPJmL ... 107
6.3.1.3 Modellierung des Anbaus von Energiepflanzen ... 107
6.3.1.4 Vergleich mit gemessenen Daten ... 108
6.3.1.5 Berechnung des globalen Bioenergiepotenzials ... 108
6.3.2 Im Modell verwendete Datensätze ... 108
6.3.2.1 Klimawandel und -daten ... 108
6.3.2.2 Landnutzungsdaten ... 108

6.4 Modellannahmen und Szenarien ... 109
6.4.1 Klimamodelle und Emissionsszenarien ... 109
6.4.2 Bewässerungsszenarien ... 109
6.4.3 Szenarien zur Berechnung der Biomassepotenziale ... 110
6.4.3.1 Szenarien zur Sicherung der Nahrungsmittelproduktion ... 110
6.4.3.2 Szenarien zum Schutz von Biodiversität und Wildnisgebieten ... 110
6.4.3.3 Szenarien zu Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderungen ... 112

6.5 Ergebnisse ... 116
6.5.1 Einfluss der Klimamodelle und Emissionsszenarien ... 116
6.5.2 Einfluss des Kompensationszeitraumes ... 117
6.5.3 Bioenergiepotenziale für vier Szenarien ... 117
6.5.4 Räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen für Energiepflanzen ... 122
6.5.5 Biomasseerträge für Bäume und Gräser ... 123

6.6 Wichtigste Unsicherheiten der Modellierung ... 128
6.6.1 Qualität der Klimadaten ... 128
6.6.2 Reaktion von Pflanzen und Ökosystemen auf den Klimawandel ... 128
6.6.3 Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen ... 129
6.6.4 Entwicklung der Erträge von Energiepflanzen ... 129
6.6.5 Landnutzungsdaten ... 129
6.6.6 Zukünftige Möglichkeiten der Bewässerung ... 129

6.7 Regionale Betrachtung ... **130**
6.7.1 Lateinamerika und Karibik ... 132
6.7.2 China und angrenzende Länder ... 133
6.7.3 Pazifisches Asien ... 133
6.7.4 Südasien mit Indien ... 134
6.7.5 Afrika südlich der Sahara ... 135
6.7.6 Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS) ... 135

6.8 Interpretation ... **136**

7 Anbau und energetische Nutzung von Biomasse ... **139**

7.1 Anbausysteme zur Produktion von Biomasse für Energiezwecke ... **139**
7.1.1 Anbau von Energiepflanzen in Monokultur ... 139
7.1.1.1 Mehrjährige Kulturen in den Tropen ... 141
7.1.1.2 Kulturen in Rotation in den gemäßigten Breiten ... 144
7.1.1.3 Mehrjährige Kulturen in den gemäßigten Breiten ... 146
7.1.2 Kurzumtriebsplantagen ... 148
7.1.3 Waldfeldbau ... 149
7.1.4 Dauergrasland und Weiden ... 150
7.1.5 Wälder als Biomasselieferanten ... 152
7.1.5.1 Biomassenutzung in tropischen Wäldern ... 152
7.1.5.2 Biomassenutzung in temperaten Wäldern ... 156
7.1.5.3 Biomassenutzung in borealen Wäldern ... 156
7.1.6 Zusammenfassende Bewertung der gegenwärtig vorherrschenden Anbaumethoden ... 158

7.2 Technisch-ökonomische Analyse und Bewertung von Bioenergienutzungspfaden ... **158**
7.2.1 Übersicht der energetischen Nutzungsmöglichkeiten ... 158
7.2.2 Technologien zur Energieumwandlung / Energiewandlungsverfahren ... 158
7.2.2.1 Verbrennung und thermo-chemische Verfahren ... 158
7.2.2.2 Physikalisch-chemische Verfahren ... 162
7.2.2.3 Biochemische Umwandlung ... 162
7.2.3 Effizienz verschiedener moderner Konversionsverfahren ... 164
7.2.3.1 Übersicht der untersuchten Bioenergienutzungspfade ... 164
7.2.3.2 Wirkungsgrade ... 165
7.2.3 Effizienz verschiedener traditioneller Konversionsverfahren ... 169
7.2.4 Ökonomische Analyse und Bewertung der Konversionsverfahren ... 173
7.2.4.1 Gestehungskosten moderner Konversionsverfahren ... 173
7.2.5.2 Diskussion der zukünftigen Kostenentwicklung von Bioenergiepfaden ... 174

7.3 Treibhausgasbilanzen ... **178**
7.3.1 Die Ökobilanz-Methodik ... 178
Durchschnittsdaten und Optimierungen ... 179
7.3.2 Treibhausgasbilanzen ausgewählter Bioenergienutzungspfade ... 179

8 Optimale Einbindung und Nutzung der Bioenergie in Energiesystemen ... **197**

8.1 Bioenergie als Teil einer nachhaltigen Energieversorgung in Industrieländern ... **197**
8.1.1 Die notwendige Transformation der Energiesysteme für mehr Energieeffizienz und Klimaschutz ... 197
8.1.1.1 Bausteine der Transformation ... 198
8.1.1.2 Transformation des Energiesystems durch Kombination der Bausteine ... 204
8.1.2 Die Rolle der Bioenergie in der nachhaltigen Energieversorgung von Industrieländern ... 204
8.1.2.1 Bioenergie im Verkehr – Biostrom versus Biokraftstoffe ... 204

8.1.2.2 Bioenergie für die Wärmebereitstellung – zentral und dezentral ... 206
8.1.2.3 Bioenergie in der Stromerzeugung – Regelenergie und Kraft-Wärme-Kopplung ... 206
8.1.2.4 Gesamtbewertung von Bioenergie in Industrieländern ... 207
8.1.2.5 Stufen der nachhaltigen Bioenergienutzung in Industrieländern ... 209

8.2 Bioenergie als Teil einer nachhaltigen Energieversorgung in Entwicklungsländern ... 210
8.2.1 Energierevolution in der traditionellen Biomassenutzung ... 210
8.2.2 Energieversorgung in ländlichen Gebieten durch Biomassenutzung ... 210
8.2.3 Die Rolle der Bioenergie in einer nachhaltigen und integrierten Energieversorgung in Entwicklungsländern ... 213
8.2.3.1 Bioenergie im Verkehr ... 213
8.2.3.2 Bioenergie als Wärme- und Lichtquelle ... 215
8.2.3.3 Bioenergie zur Stromerzeugung – zentral und dezentral ... 215
8.2.3.4 Gesamtbewertung von Bioenergie in Entwicklungsländern ... 215
8.2.3.5 Technologieschritte zu einer nachhaltigen Bioenergienutzung in Entwicklungsländern ... 217

9 Nachhaltige Produktion von Biomasse und Nutzung von Bioenergie: Synthese ... 219

9.1 Nachhaltige Produktion von Biomasse für die energetische Nutzung: Was ist zu beachten? ... 219
9.1.1 Biogene Abfall- und Reststoffe ... 219
9.1.2 Landnutzungsänderungen ... 219
9.1.3 Anbausysteme ... 220

9.2 Wandlung, Anwendung und Einbindung von Bioenergie – Nutzung von Bioenergie ... 220
9.2.1 Klimaschutz ... 221
9.2.1.1 Minderung von Treibhausgasen durch Bioenergienutzung: Messung und Standardsetzung ... 221
9.2.1.2 Berücksichtigung indirekter Landnutzungsänderungen ... 221
9.2.1.3 Substitution fossiler Energieträger ... 222
9.2.1.4 Klimaschutzwirkung unterschiedlicher technischer Anwendungen/Nutzungspfade ... 222
9.2.2 Energiearmut ... 224
9.2.3 Bioenergie als Brückentechnologie ... 225

10 Globale Bioenergiepolitik ... 229

10.1 Einleitung ... 229

10.2 Internationale Klimapolitik ... 230
10.2.1 Die UNFCCC als Akteurin globaler Bioenergiepolitik ... 230
10.2.2 Bewertung, Zuordnung und Anrechnung von Emissionen ... 231
10.2.2.1 Bestehende Regelungen und damit verbundene Probleme ... 231
10.2.2.2 Kriterien und Möglichkeiten für die Weiterentwicklung der Regelungen ... 233
10.2.3 Bioenergie und der Clean Development Mechanismus (CDM) ... 238
10.2.3.1 Bestehende Regelungen zur Bioenergie und ihre Bewertung ... 238
10.2.3.2 Möglichkeiten einer Weiterentwicklung der Regelungen ... 241
10.2.4 Ansätze einer integrierten post-2012-Lösung ... 242
10.2.5 Zwischenfazit ... 243

10.3 Standards für die Produktion von Bioenergieträgern ... 244
10.3.1 Die Anforderungen des WBGU an einen Bioenergiestandard ... 244
10.3.1.1 Mindeststandard für Bioenergieträger ... 245
10.3.1.2 Förderkriterien speziell für die Biomasseerzeugung ... 248
10.3.2 Ansätze zur Implementierung von Standards für Bioenergieträger ... 249

10.3.2.1 Standards privater, staatlicher und supranationaler Organisationen 249
10.3.2.2 Bilaterale Abkommen 255
10.3.2.3 Multilaterale Ansätze 256
10.3.3 Implikationen von Standards für den Handel mit Bioenergieträgern 257
10.3.3.1 Standards als Handelshemmnis 257
10.3.3.2 Implikationen für Handelsbeziehungen mit Entwicklungs- und Schwellenländern 258
10.3.3.3 Präferenzielle Behandlung von Bioenergieträgern durch Qualifizierung als „Environmental Goods and Services„ (EGS) 259
10.3.4 WTO-Kompatibilität von Standards für Bioenergieträger 260
10.3.4.1 Relevanz des WTO-Rechts bei der Standardsetzung 260
10.3.4.2 Rechtfertigung diskriminierender Maßnahmen 261
10.3.4.3 Juristische Bewertung der vom WBGU empfohlenen Nachhaltigkeitsstandards 262
10.3.5 Zwischenfazit 263

10.4 Ansätze zur Sicherung der Welternährung im Rahmen einer nachhaltigen Bioenergiepolitik 264
10.4.1 Neue Herausforderungen durch die Bioenergienutzung 264
10.4.2 Kurzfristige Maßnahmen zur Krisenbewältigung 266
10.4.2.1 Transferprogramme (Safety-nets) und andere fiskalische Maßnahmen 266
10.4.2.2 Administrative Höchstpreise 266
10.4.2.3 Kurzfristige Hilfen für die kleinbäuerliche Produktion 267
10.4.2.4 Exportbeschränkungen für Agrarprodukte 267
10.4.2.5 Abbau weiterer Handelsverzerrungen auf den Weltagrarmärkten 268
10.4.2.6 Finanzielle Hilfe, Nothilfe und Reform der Nahrungsmittelkonvention 268
10.4.3 Mittel- und langfristige wirkende Maßnahmen 269
10.4.3.1 Bioenergiestrategien und Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen 269
10.4.3.2 Förderung des kleinbäuerlichen Agrarsektors in Entwicklungsländern und Agrarforschung 270
10.4.3.3 Weitergehende, differenzierte Liberalisierung der Weltagrarmärkte 271
10.4.3.4 Förderung des Bewusstseins über die Folgen unterschiedlicher Ernährungsstile 272
10.4.3.5 Aufbau von Frühwarn- und Risikomanagementsystemen 274
10.4.4 Prioritäre Handlungsfelder zur Sicherung des Vorrangs für Nahrungsproduktion und Ernährungssicherheit 274

10.5 Internationale Biodiversitätspolitik und nachhaltige Bioenergie 275
10.5.1 Schutzgebiete und Schutzgebietssysteme 276
10.5.1.1 CBD-Arbeitsprogramm zu Schutzgebieten 276
10.5.1.2 Weitere Regelungen der CBD 277
10.5.1.3 Optionen für die Weiterentwicklung 277
10.5.2 Schwerpunkt: Finanzierung von Schutzgebietssystemen durch Kompensationszahlungen 278
10.5.2.1 Finanzierung des globalen Schutzgebietsnetzes durch internationale Zahlungen 279
10.5.2.2 Optionen für die Weiterentwicklung – Anforderungen an ein internationales Kompensationsregime 281
10.5.3 Beiträge der CBD für die Entwicklung von Bioenergiestandards 282
10.5.3.1 Bestimmungen der CBD als Grundlagen für Bioenergiestandards 282
10.5.3.2 Wege zur Umsetzung biodiversitätsrelevanter Bioenergieleitlinien oder -standards 284
10.5.4 Schlussfolgerungen und Ausblick 285

10.6 Wasser- und Bodenschutz im Kontext einer nachhaltigen Bioenergiepolitik 285
10.6.1 Bodenschutz und Desertifikationsbekämpfung: Möglichkeiten und Grenzen der

UNCCD ... 285
10.6.2 Schutz und nachhaltige Nutzung von Süßwasser ... 287

10.7 Staatliche Förderung der Bioenergie: Agrar- und industriepolitische Maßnahmen ... 288
10.7.1 Förderung von Bioenergiepfaden durch den klimapolitischen Rahmen ... 288
10.7.2 Förder- und Interventionsansätze im Rahmen einer nachhaltigen Bioenergiepolitik ... 289
10.7.3 Landwirtschaftspolitik: Förderung des Anbaus von Biomasse für energetische Nutzungen ... 289
10.7.3.1 Bestimmte Anbaumethoden und bestimmte Ökosystemleistungen bevorzugen ... 290
10.7.3.2 Internationale Initiativen ... 290
10.7.4 Förderung der energetischen Verwertung biogener Abfälle und Reststoffe ... 290
10.7.5 Technologiepolitik zur Förderung ausgewählter Konversionspfade ... 293
10.7.5.1 Energetische Nutzung von Biomethan ... 293
10.7.5.2 Effiziente Anlagentechnik in der Strom- und Wärmerzeugung ... 295
10.7.5.3 Direkte Verbrennung fester Biomasse zur Wärmerzeugung in privaten Haushalten ... 296
10.7.6 Förderung von Bioenergie in der Endnutzung ... 297
10.7.7 Internationale Initiativen und Institutionen zur Förderung nachhaltiger Bioenergie ... 298
10.7.7.1 Internationale Agentur für Erneuerbare Energien (IRENA) ... 299
10.7.7.2 International Conference on Sustainable Bioenergy ... 299
10.7.7.3 Multilaterales Energiesubventionsabkommen (MESA) ... 300
10.7.8 Fazit ... 300

10.8 Bioenergie und Entwicklungszusammenarbeit ... 301
10.8.1 Aktuelle Bioenergieaktivitäten in der internationalen Entwicklungszusammenarbeit ... 301
10.8.1.1 Weltbankgruppe und Regionale Entwicklungsbanken ... 302
10.8.1.2 Programme und Sonderorganisationen der Vereinten Nationen ... 303
10.8.1.3 Entwicklungszusammenarbeit der Europäischen Union und der Bundesrepublik ... 305
10.8.1.4 Status Quo der internationalen Entwicklungszusammenarbeit im Bereich der Bioenergie ... 307
10.8.2 Bioenergiestrategien für Entwicklungsländer ... 308
10.8.2.1 Bekämpfung der Energiearmut durch netzunabhängige ländliche Energieversorgung ... 309
10.8.2.2 Modernisierung der Energiesektoren und Exportproduktion ... 311
10.8.2.3 Kernelemente nationaler Bioenergiestrategien für Entwicklungsländer ... 313
10.8.3 Handeln unter Unsicherheit: Schlussfolgerungen für eine aktive Förderpolitik ... 317

11 Forschungsempfehlungen ... 319

11.1 Bioenergienutzung und Klimabilanz ... 319
11.1.1 Verbesserung der Treibhausgasbilanzierung beim Anbau von Bioenergie ... 319
11.1.2 Integrierte Bewertung von Klimaschutzoptionen der Land- und Biomassenutzung ... 320
11.1.3 Sequestrierung von biogenem Kohlenstoff im Erdreich und CO_2 in Depots ... 321

11.2 Nachhaltige Potenziale für Bioenergie ... 321
11.2.1 Landwirtschaftliche Probleme bei Anbau und Nutzung von Energiepflanzen ... 321
11.2.2 Internationale Forschungsprogramme zu nachhaltigen und ökonomischen Bioenergiepotenzialen ... 322
11.2.3 Soziale Nachhaltigkeit ... 324

11.3 Bioenergie und Energiesysteme (modern, traditionell) ... 324

11.3.1 Technologien der Bioenergienutzung ... 324
11.3.2 Potenzial der energetischen Nutzung von Abfall- und Reststoffen ... 325
11.3.3 Modernisierung traditioneller Bioenergienutzung zur Überwindung der Energiearmut ... 326
11.3.4 Integrierte Technologieentwicklung und -bewertung zur Bioenergie ... 326

11.4 Bioenergie und globales Landnutzungsmanagement ... 327
11.4.1 Datenbasis für globale Landnutzung und Degradation ... 327
11.4.2 Integrierte naturwissenschaftliche und ökonomische Landnutzungsmodellierung ... 327
11.4.3 Akteure und Treiber, sowie Gesamteffekte aus Einzelentscheidungen auf die Landnutzung ... 328
11.4.4 Wechselwirkungen zwischen Energiepflanzenanbau und Ernährungssicherung ... 328
11.4.5 Wirkungen veränderter Ernährungsmuster und Lebensstile auf Klima und Landnutzung ... 328

11.5 Gestaltung internationaler Bioenergiepolitik ... 329
11.5.1 Management der globalen Landnutzung ... 329
11.5.2 Standardsetzung und WTO-rechtliche Rahmenbedingungen ... 329
11.5.3 Bioenergiepolitik und Sicherheitspolitik ... 330
11.5.4 Weiterentwicklung der Verpflichtungsregime unter UNFCCC und CBD ... 330
11.5.5 Methoden zur Unterstützung von Entscheidungen unter Unsicherheit ... 330

12 Handlungsempfehlungen ... 333

12.1 Bioenergie konsistent in die internationale Klimaschutzpolitik einbinden ... 334

12.2 Standards und Zertifizierung für Bioenergie und nachhaltige Landnutzung einführen ... 336

12.3 Nutzungskonkurrenzen nachhaltig regulieren ... 339
12.3.1 Integrierte Bioenergie- und Ernährungssicherungsstrategie entwickeln ... 339
12.3.2 Kopplung von Landnutzung, Nahrungsmittel- und Energiemärkten besser berücksichtigen ... 339
12.3.3 Steigenden Druck auf die Landnutzung durch sich ändernde Ernährungsweisen stärker beachten ... 340
12.3.4 Biodiversitätspolitik für einen nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen umsetzen ... 341
12.3.5 Wasser- und Bodenschutz mit dem Anbau Energiepflanzen langfristig verbessern ... 343

12.4 Förderpolitiken für Bioenergie gezielt einsetzen ... 343
12.4.1 Agrarförderung umgestalten ... 344
12.4.2 Energetische Nutzung biogener Abfall- und Reststoffe voranbringen ... 344
12.4.2 Technologiepolitik neu ausrichten ... 345

12.5 Nachhaltiges Bioenergiepotenzial in Entwicklungs- und Schwellenländern nutzen ... 347

12.6 Strukturen für eine nachhaltige globale Bioenergiepolitik schaffen ... 349

13 Literatur ... 353

Kästen

Kasten 2-1 Begriffe: Bioenergie, Biokraftstoffe, Agro- oder Agrarkraftstoffe ... 23
Kasten 3.2-1 Exkurs: Kalorienbedarf eines Menschen ... 32
Kasten 4.1-1 Anwendung der Substitutionsmethode ... 36
Kasten 4.1-2 Aktuelle Bioenergienutzung und -förderpolitik in den USA ... 44
Kasten 4.1-3 Aktuelle Bioenergiepolitik und -nutzung in der EU ... 49
Kasten 4.2-1 Begriffsdefinition „marginale Flächen" ... 53
Kasten 5.2-1 Ist das Phosphatfördermaximum („peak phosphorus") bereits überschritten? ... 68
Kasten 5.2-2 Länderstudie China – Nutzungskonkurrenz „Food vs. Fuel" ... 74
Kasten 5.4-1 Schutzgebiete: Status Quo und Trends ... 80
Kasten 5.4-2 Länderstudie Indonesien – Nutzungskonkurrenz mit Naturschutz ... 82
Kasten 5.4-3 Invasive, gebietsfremde Arten ... 85
Kasten 5.5-1 Flächenbedarf von Solarenergie und Photosynthese im Vergleich ... 89
Kasten 5.5-2 Black Carbon Sequestration als Klimaschutzoption ... 94
Kasten 6.1-1 Potenzialdefinitionen ... 102
Kasten 6.7-1 Soziökonomische und politische Indikatoren ... 130
Kasten 6.7-2 Länderstudie Indien – Die Nutzung marginaler Flächen für die Biokraftstoffproduktion ... 134
Kasten 6.8-1 Potenzial der Minderung der atmosphärischen CO_2-Konzentration durch Bioenergienutzung mit CO_2-Sequestrierung ... 136
Kasten 7.1-1 Zuckerrohr *(Saccharum officinarum* L.*)* ... 142
Kasten 7.1-2 Ölpalme *(Elaeis guineensis* Jacq.) ... 143
Kasten 7.1-3 Jatropha *(Jatropha curcas* L.*)* ... 144
Kasten 7.1-4 Mais *(Zea mays* L.*)* ... 144
Kasten 7.1-5 Raps *(Brassica napus* ssp. *oleifera* L.*)* ... 145
Kasten 7.1-6 Triticale *(Triticum aestivum* L. x *Secale cereale* L.*)* ... 146
Kasten 7.1-7 Chinaschilf *(Miscanthus sinensis* Anderss.) ... 147
Kasten 7.1-8 Rutenhirse *(Panicum virgatum* L.*)* ... 147
Kasten 7.1-9 Algen als Lieferanten von Bioenergie ... 148
Kasten 7.1-10 Kurzumtriebsplantagen (KUPs) ... 150
Kasten 7.1-11 Potenziale und Risiken Grüner Gentechnik ... 154
Kasten 7.2-1 Definitionen ... 159
Kasten 7.2-2 Biomethan: ein vielversprechender Bioenergieträger ... 164
Kasten 7.2-3 Methodik, Bilanzgrenzen und Berechnung der Nennwirkungsgradmethode ... 170
Kasten 7.2-4 Die Allokationsmethode – Anwendung zur Ermittlung des spezifischen Energieaufwands ... 175
Kasten 7.3-1 Umgang mit Koppelprodukten – Die Allokationsmethode ... 179
Kasten 7.3-2 Quantifizierung der Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen ... 180
Kasten 7.3-3 Treibhausgasreduktionen durch Effizienzverbesserungen bei der traditionellen Biomassenutzung ... 186
Kasten 8.2-1 Gesundheitliche und ökologische Auswirkungen der traditionellen Biomassenutzung ... 211
Kasten 8.2-2 Länderstudie Uganda – Überwindung traditioneller Bioenergienutzung durch aktive Bioenergiepolitik ... 212

Kasten 8.2-3	Entwicklungschancen der Bioenergieproduktion für den überregionalen Binnenmarkt und den Export	214
Kasten 8.2-4	Länderstudie Brasilien – Schwellenland mit langjähriger dezidierter Bioenergiepolitik	216
Kasten 10.2-1	„Harvested Wood Products“	234
Kasten 10.2-2	Reducing Emissions from Deforestation and Degradation (REDD) in der UNFCCC	237
Kasten 10.2-3	Internationale Zahlungen für den Schutz von Kohlenstoffvorräten und -senken	238
Kasten 10.2-4	Globale Umweltfazilität und Bioenergie	240
Kasten 10.3-1	Möglichkeiten der Erfassung von indirekten Landnutzungsänderungen in einem Bioenergiestandard	246
Kasten 10.3-2	Vom Rat der Europäischen Union vorgeschlagene Nachhaltigkeitskriterien für flüssige Biokraftstoffe im Rahmen der geplanten EU-Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien	250
Kasten 10.3-3	Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB)	254
Kasten 10.3-4	Global Bioenergy Partnership (GBEP)	255
Kasten 10.3-5	Vision einer globalen Kommission für nachhaltige Landnutzung	258
Kasten 10.4-1	Die Rolle der FAO in der globalen Bioenergiepolitik	267
Kasten 10.4-2	Der Weltagrarrat (IAASTD) als neuer Akteur der globalen Agrarpolitik	269
Kasten 10.4-3	Zentrale Empfehlungen der Ressortarbeitsgruppe Welternährungslage	272
Kasten 10.5-1	Zahlungen für Ökosystemleistungen in Costa Rica	279
Kasten 10.5-2	Etablierung eines internationalen Markts für zertifizierte Schutzleistungen	280
Kasten 10.5-3	Klimaschutz und Biodiversitätsschutz im Rahmen der internationalen Klimapolitik	283
Kasten 10.6-1	Implikationen stofflicher Nutzung von Biomasse für die Politik	286
Kasten 10.8-1	Indien – *Jatropha*-Anbau als Entwicklungsmodell	315
Kasten 11-1	Bioenergie und Landnutzung: Die wichtigsten Forschungsfelder	320
Kasten 12.2-1	Mindeststandards für die Bioenergieproduktion	337

Tabellen

Tabelle 4.1-1 Produktion von Ethanol als Brennstoff in den Hauptproduktionsländern und weltweit (Zahlen für 2007). ... 39
Tabelle 4.1-2 Globale Produktion von Biodiesel in ausgewählten Produktionsländern und weltweit (Zahlen für 2007). ... 41
Tabelle 4.1-3 Globale Anbaufläche, Produktion und Nettohandel bei Getreide und Zucker ... 41
Tabelle 4.1-4 Globale Anbaufläche, Produktion und Nettohandel bei ausgewählten Ölsaaten und Pflanzenölen ... 42
Tabelle 4.1-5 Beispiele für Bioenergieförderpolitik in ausgewählten Ländern ... 46
Tabelle 4.2-1 Qualitative Bewertung der Auswirkungen direkter Landnutzungsänderungen auf die biologische Vielfalt, die Kohlenstoffmenge in Boden und Vegetation ... 59
Tabelle 5.2-1 Durchschnittlich verfügbare Nahrungsenergie in verschiedenen Weltregionen (kcal pro Person und Tag) ... 63
Tabelle 5.2-2 Verbrauch von Fleisch, Milch und Milchprodukten in verschiedenen Weltregionen . 64
Tabelle 5.2-3 Landwirtschaftliche Fläche pro Person in verschiedenen Weltregionen (ha/Person). 65
Tabelle 5.2-4 Flächenbedarf in m^2/kg von Nahrungsmitteln in verschiedenen Ländern ... 66
Tabelle 5.2-5 Flächenbedarf von Lebensmitteln pro verzehrsfähiger Energie des Produkts ... 66
Tabelle 5.2-6 Aneignung der Nettoprimärproduktion natürlicher Ökosysteme durch den Menschen: Regionale Verteilung ... 68
Tabelle 5.2-7 Länder mit hoher Ernährungsunsicherheit, die als Nettoimporteure von Öl und Getreide besonders Preisanstiegen ausgesetzt sind. ... 73
Tabelle 5.2-8 Anteil an Haushalten, die in ausgewählten Ländern über das Subsistenzniveau hinaus produzieren (und damit Nettoverkäufer von Grundnahrungsmitteln sind). ... 73
Tabelle 5.3-1 Produktion und Welthandel mit Forstprodukten. Handelsdaten sind jeweils der Mittelwert von Import und Export aus offiziellen Statistiken ... 77
Tabelle 5.4-2 Gewünschte ökologische Eigenschaften für Bioenergiepflanzen und ihre Relevanz für das Risiko invasiver Pflanzenarten ... 85
Tabelle 5.5-1 Zeitdynamiken der Klimaschutzoptionen im Landnutzungsbereich ... 95
Tabelle 5.6-1 Regionale Unterschiede bei der Wassernutzung für Energiepflanzen ... 98
Tabelle 6.1-1 Technisches (TP), wirtschaftliches (WP) und nachhaltiges Potenzial (NP) der Bioenergie aus verschiedenen Studien ... 105
Tabelle 6.4-1 Anteil geschützter Flächen zum Schutz von Wildnisgebieten und Biodiversität für die beiden Szenarien ... 112
Tabelle 6.5-1 Definition der vier vom WBGU verwendeten Landnutzungsszenarien. ... 117
Tabelle 6.5-2 Potenzielle Anbauflächen sowie Bioenergiepotenziale für die Jahre 2000 sowie 2050 und die vier Landnutzungsszenarien ... 117
Tabelle 6.5-3 Bioenergiepotenziale für das Jahr 2000 in einzelnen Weltregionen für vier Landnutzungsszenarien ... 122
Tabelle 6.5-4 Bioenergiepotenziale für das Jahr 2050 in einzelnen Weltregionen für vier Landnutzungsszenarien ... 122
Tabelle 7.1-1 Vor- und Nachteile des Energiepflanzenanbaus in Monokulturen ... 141
Tabelle 7.1-2 Vor- und Nachteile von Kurzumtriebsplantagen ... 149
Tabelle 7.1-3 Vor- und Nachteile des Waldfeldbaus ... 151
Tabelle 7.1-4 Vor- und Nachteile von *reduced-impact logging* im tropischen Regenwald. ... 153
Tabelle 7.1-5 Zusammenfassung und qualitative Bewertung der Produktivität, der Auswirkung

	auf die Biodiversität und die Kohlenstoffspeicherung im Boden der vorgestellten Anbausysteme	157
Tabelle 7.2-1	Auswahl verschiedener Anbausysteme, die vom WBGU untersucht wurden	166
Tabelle 7.2-2	Auswahl verschiedener technischer Konversionsverfahren.	167
Tabelle 7.3-1	Standardwerte für flächenbezogene Treibhausgasemissionen durch direkte Landnutzungsänderungen für verschiedene als Energiepflanzen nutzbare Kulturen in kg CO_2 pro ha und Jahr	180
Tabelle 7.3-2	Energiebezogene Treibhausgasemissionen aus direkter (dLUC) und indirekter Landnutzungsänderung (iLUC) bei verschiedenen Anbausystemen und verschiedenen Vornutzungen	181
Tabelle 7.3-3	Emissionen der fossilen Referenzsysteme, die vom WBGU zur Ableitung der Treibhausgasvermeidungspotenziale der einzelnen Bioenergienutzungspfade herangezogen werden	184
Tabelle 7.3-4	Brutto-Energie-Hektarerträge, die zur Berechnung der THG-Emissionen in den einzelnen Bioenergienutzungspfaden verwendet wurden sowie die errechnete Bandbreite aus verschiedenen Hektarerträgen der Literatur	193
Tabelle 8.2-1	Menschen, die auf Biomasse als primäre Energiequelle zum Kochen angewiesen sind	211
Tabelle 9.2-1	Synthese der Bewertung der Bioenergiepfade, jeweils aufgeschlüsselt nach Anbausysten, technischer Analyse und Treibhausgasbilanz	226
Tabelle 10.2-1	Bisherige Praxis der Inventare und Anrechnungen in der ersten Verpflichtungsperiode des Kioto-Protokolls bezogen auf die Treibhausgas-Bilanzkette bei der Bioenergienutzung	232
Tabelle 10.3-1	Ausgewählte Beispiele für bestehende und sich in Entwicklung befindliche Standards und Zertifizierungssysteme für Biomasseerzeugnisse nach Sektoren	252

Abbildungen

Abbildung 1 Potenzialregionen für Bioenergie mit Ländern, die von fragiler Staatlichkeit oder Staatszerfall betroffen sind 4
Abbildung 4.1-1 Anteile der Energieträger am globalen Primärenergiebedarf. a) nach der Wirkungsgradmethode im Jahr 2005 36
Abbildung 4.1-2 Aufteilung der globalen Bioenergienutzung (Primärenergie, insgesamt 50,3 EJ) in Strom-, Wärme- und Kraftstoffbereitstellung. 37
Abbildung 4.1-3 Globale Produktion von Ethanol für die Verwendung als Brennstoff 39
Abbildung 4.1-4 Globale Produktion von Biodiesel. 40
Abbildung 4.1-5 Produktionskosten für ausgewählte Biokraftstoffe 2004–2007 in Hauptproduktionsländern 43
Abbildung 4.2-1 Globale Verteilung der Landbedeckung, gestützt auf MODIS Satellitendaten (1 km Auflösung) des IGBP 51
Abbildung 4.2-2 Konzeptuelles Modell von Lebensräumen mit unterschiedlichem anthropogenem Einfluss 52
Abbildung 4.2-3 Geschätzte Veränderungen der Landnutzung zwischen 1700 und 1995 54
Abbildung 4.2-4 Aktuelle globale Ausbreitung von Acker- und Weideflächen 54
Abbildung 4.2-5 Veränderung der Menge organischen Materials auf dem Waldboden nach Kahlschlag nordischer Laubholzwaldbestände 56
Abbildung 4.2-6 Die Beziehung zwischen dem Nettokohlenstofffluss und dem Waldbestandsalter nach einer Störung 56
Abbildung 4.2-7 Organischer Kohlenstoff in zwei Bodentiefen in Abhängigkeit der Vegetationsdecke 58
Abbildung 5.2-1 Zeitlicher Verlauf von Nahrungsmittel- und Ölpreisen seit 1980 70
Abbildung 5.2-2 Entwicklung der Getreidepreise zwischen 2000 und 2007 71
Abbildung 5.2-3 Einfluss von prognostizierten Preisanstiegen bei Nahrungsmitteln (2007–2008) auf Handelsbilanzen 72
Abbildung 5.3-1 Nutzungsketten zur stofflichen Biomassenutzung 76
Abbildung 5.3-2 Handel mit Forstprodukten – Regionale Trends seit 1990 78
Abbildung 5.4-1 Zunahme der Schutzgebietsfläche weltweit 80
Abbildung 5.4-2 Repräsentativität von Ökoregionen im bestehenden Schutzgebietssystem 80
Abbildung 5.4-3 Entwicklung der Anbaufläche für Ölpalmen in Indonesien 82
Abbildung 5.5-1 Globale Emissionen aus Entwaldung, aufgeschlüsselt nach Staaten 89
Abbildung 5.5-2 Gegenwärtige flächenbezogene Nettoprimärproduktion 91
Abbildung 5.5-3 Klimaschutz durch geeignete Landnutzung: Abwägung der Optionen am Beispiel des Forstsektors 94
Abbildung 5.5-4 Schema des globalen Kohlenstoffkreislaufs 95
Abbildung 5.6-1 Entwicklung der Pro-Kopf Wasserentnahme und -verfügbarkeit in ausgewählten Ländern in einem Szenario bis 2075 99
Abbildung 6.4-1 Für den Anbau von Bioenergie ausgeschlossene höchst degradierte Flächen sowie stark degradierte Böden, auf denen 30 % Erträge angenommen werden 109
Abbildung 6.4-2 (a) Anteil der aktuellen landwirtschaftlichen Flächen in den Gitterzellen des Modells 111
Abbildung 6.4-3 Räumliche Verteilung der aktuell unter Naturschutz stehenden Gebiete mit einer Gesamtfläche von 1.330 Mio. ha 112

Abbildung 6.4-4 Für den Anbau von Bioenergiepflanzen ausgeschlossene Gebiete zum Schutz der Biodiversität und von unberührter Wildnis für die beiden im Text beschriebenen Szenarien....113
Abbildung 6.4-5 Von der Biomassenutzung ausgeschlossene Feuchtgebiete mit einer Gesamtfläche von 1.150 Mio. ha 114
Abbildung 6.4-6 Dargestellt sind Regionen, in denen der Anbau von Biomasse den Verlust von Kohlenstoff durch die Landnutzungsänderung nicht innerhalb von fünf Jahren bzw. 10 Jahren ausgleichen kann. 115
Abbildung 6.4-7 Globale Verbreitung von Waldgebieten....116
Abbildung 6.5-1 Räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen für Szenario 1....118
Abbildung 6.5-2 Räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen für Szenario 2....119
Abbildung 6.5-3 Räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen für Szenario 3....120
Abbildung 6.5-4 Räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen für Szenario 4....121
Abbildung 6.5-5 Die zehn Weltregionen, die in diesem Kapitel verwendet werden. 123
Abbildung 6.5-6 Simulierte Biomasseerträge im Jahr 2050 für Gräser im unbewässerten und bewässerten Anbau....124
Abbildung 6.5-7 Simulierte Biomasseerträge im Jahr 2050 für Bäume im unbewässerten und bewässerten Anbau....125
Abbildung 6.5-8 Simulierte Biomasseerträge im Jahr 2050 für Gräser im unbewässerten und bewässerten Anbau....126
Abbildung 6.5-9 Simulierte Biomasseerträge im Jahr 2050 für Bäume im unbewässerten und bewässerten Anbau....127
Abbildung 6.6-1 Geographische Verteilung der Nutztierdichte weltweit....128
Abbildung 6.7-1 Potenzialregionen für Bioenergie mit Ländern, die von fragiler Staatlichkeit oder Staatszerfall betroffen sind....131
Abbildung 7.1-1 Konzeptionelle Darstellung verschiedener Landnutzungsarten und ihre Wechselwirkung mit Ökosystemleistungen....140
Abbildung 7.2-1 Vereinfachte Darstellung typischer Bereitstellungsketten zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse 160
Abbildung 7.2-2 Bilanzgrenzen zur Wirkungsgradberechnung....171
Abbildung 7.2-3 Überblick über die exergetischen und energetischen Wirkungsgrade der untersuchten Bioenergienutzungspfade 173
Abbildung 7.2-4a Gestehungskosten von Bioenergiepfaden zur Stromproduktion 176
Abbildung 7.2-4b Gestehungskosten von Bioenergiepfaden zur Wärmeproduktion 176
Abbildung 7.2-4c Gestehungskosten von Bioenergiepfaden im Mobilitätsbereich....177
Abbildung 7.3-1 Treibhausgasemissionen aus direkter (dLUC) und indirekter Landnutzungsänderung (iLUC) für verschiedene Energiepflanzen und Landflächen....183
Abbildung 7.3-2 Prozentuale Minderung der Treibhausgasemissionen gegenüber einem fossilen Referenzsystem durch die Substitution fossiler Brennstoffe bezogen auf die End- bzw. Nutzenergie für ausgewählte Bioenergienutzungspfade....184
Abbildung 7.3-3 Absolute Minderung der THG-Emissionen durch die Substitution fossiler Brennstoffe für verschiedene Energiepflanzen in temperaten Klimazonen bzw. tropischen Klimazonen bezogen auf die zugeordnete Anbaufläche....188
Abbildung 7.3-4 Absolute Minderung der THG-Emissionen durch die Substitution fossiler Brennstoffe für verschiedene Bioenergienutzungspfade bezogen auf den Brutto-Energiegehalt der eingesetzten Biomasse 190
Abbildung 7.3-5 Sensitivität der absoluten THG-Minderung bezogen auf die eingesetzte Menge an Biomasse gegenüber dem Referenzsystem anhand des Beispiels der Nutzung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen in Form von Biomethan für ein GuD-Kraftwerk....192
Abbildung 7.3-6 Kosten der Treibhausgasvermeidung durch den Einsatz verschiedener

Bioenergienutzungspfade, berechnet nach Gleichung 7.3-1 195
Abbildung 8.1-1 Effizienzgewinn durch den Umstieg auf erneuerbare Energien, bei denen aus Solar-, Wasser- und Windenergie direkt Strom erzeugt wird 198
Abbildung 8.1-2 Transformation des Stromsektors 199
Abbildung 8.1-3 Effizienzvergleich zwischen der Nutzung fossiler bzw. biogener Kraftstoffe im Verkehr und der Elektromobilität 200
Abbildung 8.1-4 Effizienzgewinn im Verkehr 200
Abbildung 8.1-5 Transformation des Verkehrssektors 201
Abbildung 8.6-1 Effizienzgewinn durch die Nutzung der Umgebungswärme mit Wärmepumpen, die mit regenerativem Strom betrieben werden 201
Abbildung 8.1-7 Transformation des Wärmesektors 202
Abbildung 8.1-8 Die Transformation des Energiesystems am Beispiel des Industrielands Deutschland 203
Abbildung 8.1-9 Vergleich verschiedener Konversionspfade im Verkehrssektor im Bezug auf die am Rad nutzbare mechanische Energie 203
Abbildung 8.1-10 Primärenergetische Reichweite von PKW 206
Abbildung 8.1-11 Zukünftige, nachhaltige Energieversorgungsstrukturen in Industrieländern 208
Abbildung 8.1-12 Erste Stufe der nachhaltigen Bioenergienutzung in Industrieländern 208
Abbildung 8.1-13 Zweite Stufe der nachhaltigen Bioenergienutzung in Industrieländern 208
Abbildung 10.4-1 Potenzialregionen für Bioenergie mit Ländern, die zur Gruppe der LIFDCs zählen 265
Abbildung 10.8-1 Entscheidungshilfe zur Entwicklung von Bioenergiestrategien in Entwicklungs- und Schwellenländern 312

Akronyme

AKP	African, Caribbean and Pacific Group of States *Gruppe der afrikanischen, karibischen und pazifischen Staaten*
AoA	Agreement on Agriculture (WTO) *Landwirtschaftsübereinkommen*
APS	Allgemeines Präferenzsystem (EU)
BEFS	Bioenergy and Food Security Project (FAO) *Projekt Bioenergie und Ernährungssicherheit*
BHKW	Blockheizkraftwerk
BioNachV	Biomasse-Nachhaltigkeitsverordnung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BtL	Biomass-to-Liquid *Synthetische Biokraftstoffe*
CBD	Convention on Biological Diversity *Biodiversitätskonvention, auch: Übereinkommen über die Biologische Vielfalt*
CCX	Chicago Climate Exchange *Nationales Emissionshandelssystem*
CDM	Clean Development Mechanism (Kioto-Protokoll) *Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung*
CFBB	Circulating Fluidized Bed Boilers *Wirbelschichtdampferzeuger*
CFU	Carbon Finance Unit (Weltbank) *CO_2-Finanzierungseinheit*
CGIAR	Consultative Group on International Agricultural Research *Konsultativgruppe für internationale landwirtschaftliche Forschung*
CHP	Combined Heat and Power; s. KWK *Kraft-Wärme-Kopplung*
CITES	Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (UN) *Konvention über den internationalen Handel mit gefährdeten, wildlebenden Tier- und Pflanzenarten, auch: Washingtoner Artenschutzübereinkommen*
CRIC	Commitee for Regional Implementation of the Convention (UNCCD)
CPDs	Centers of Plant Diversity (IUCN)
CSD	Commision on Sustainable Development (UN) *Kommission für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen*
CSR	Corporate Social Responsibility *Unternehmenssozialverantwortung*
CST	Committee on Science and Technology (UNCCD)
CTE	Ausschuss für Handel und Umwelt (WTO)
DED	Deutscher Entwicklungsdienst
DGVM	Dynamic Global Vegetation Model (PIK) *Dynamisches Vegetationsmodell*
DOE	United States Department of Energy

	Energieministerium USA
DOK	Biologisch-dynamische, organisch-biologische und konventionelle Landwirtschaft im Vergleich (FiBL)
EEC	European Energy Certificate System
	Intereuropäisches Transfersystem für RECs
EGS	Environmental Goods and Services (WTO)
EIB	Europäische Investitionsbank
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
ETI	Ethical Trading Initiative
	Initiative für ethischen Handel
EU	Europäische Union
EUGENE	European Green Electricity Network
EZ	Entwicklungszusammenarbeit
FATF	Financial Action Task Force on Money Laundering
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
	Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen
FFH	Flora Fauna und Habitat-Richtlinie (EU)
FLO	Fairtrade Labelling Organizations International
	Dachorganisation für fairen Handel
FSC	Forest Stewardship Council
GAP	Good Agricultural Practice
	Gute landwirtschaftliche Praxis
GATT	General Agreement on Tariffs and Trade
	Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen
GBEP	Global Bioenergy Partnership (FAO)
	Netzwerk zur Förderung von Energie aus Biomasse
GCM	General Circulation Model
	Atmosphärisches Zirkulationsmodell
GEEREF	The Global Energy Efficiency and Renewable Energy Fund (EU)
	Globaler Eigenkapital-Hedgefonds in nachhaltigen Energien
GEF	Global Environment Facility (UNDP, UNEP, Weltbank)
	Globale Umweltfazilität
GENESIS	Global Environmental and Ecological Simulations of Interactive Systems
GLC 2000	Global Land Cover 2000 (EU, IES)
	Datenbank über die Bodenbedeckung der Erde im Jahr 2000
GSP	Generalised System of Preferences (EU)
	Allgemeines Präferenzsystem der EU
GSPC	Global Strategy for Plant Conservation (CBD)
	Globale Strategie zum Schutz der Pflanzen
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
GVEP	Global Village Energy Partnership (Weltbank)
GVOs	Genetisch Veränderte Organismen
HANPP	Human Appropriation of Net Primary Production
	Menschliche Aneignung der potentiellen Nettoprimärproduktion
HCVAs	High Conservation Value Areas
	Flächen mit hohem Schutzwert
IBEP	International Bioenergy Platform (FAO)
	Internationale Bioenergie-Plattform
ICLEI	Local Governments for Sustainability
	Internationaler Rat für Kommunale Umweltinitiativen
ICRISAT	International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (CGIAR)
ICSU	International Council for Science
	Internationaler Rat der wissenschaftlichen Unionen
IEA	International Energy Agency (OECD)
	Internationale Energieagentur
IES	Institute for Environment and Sustainability (EU)

IFOAM	International Federation of Organic Agriculture Movements *Internationale Dachorganisation des ökologischen Landbaus*
IGBP	International Geosphere Biosphere Program (ICSU)
IHDP	International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (ISSC, ICSU)
ILO	International Labour Organization (UN) *Internationale Arbeitsorganisation*
IMAGE	Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect (PIK) *Klimawirkungsmodell*
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (WMO, UNEP) *Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen*
ISSC	International Social Science Council (UNESCO)
ITTO	International Tropical Timber Organization *Internationale Organisation für tropisches Holz*
IUCN	International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, *auch:* World ConservationUnion *Weltnaturschutzunion*
IWF	Internationaler Währungsfonds *International Monetary Fund*
KfW	KfW Bankengruppe
KUP	Kurzumtriebsplantage *Short-rotation Forestry; auch: Short-rotation Coppice*
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LDCs	Least Developed Countries *Am wenigsten entwickelte Länder*
LIFDCs	Low Income Food Deficit Countries (FAO, WFP) *Länder mit niedrigem Einkommen und Nahrungsdefiziten*
LIHD	Low-Intensity-High-Diversity
LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry *Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft im Kioto Protokoll und seinen Umsetzungen*
MDGs	Millennium Development Goals (UN) *Millennium-Entwicklungsziele der Vereinten Nationen*
MERCOSUR	Mercado Común del Sur (Argentinien, Brasilien, Paraguay, Uruguay) *Gemeinsamer Markt des Südens*
MESA	Multilaterales Energiesubventionsabkommen (empfohlen)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer *Wissenschaftliches Instrument zur Messung elektromagnetischer Strahlung*
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index *Normalisierter Differenzvegetationsindex*
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration *Wetter- und Ozeanografiebehörde der Vereinigten Staaten*
NRO	Nichtregierungsorganisation
NSDS	National Sustainable Development Strategies (UN) *Nationale Nachhaltigkeitsstrategien*
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development *Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung*
PEFC	Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes *Zertifizierungssystem für nachhaltige Waldbewirtschaftung*
PES	Payments for Environmental Services *Konzept der Entgeltung von Umweltleistungen*
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PNPB	National Biodiesel Production & Use Program (Brasilien)
PP-G7	Pilotprogramm zur Bewahrung der tropischen Regenwälder Brasiliens (NROs, Weltbank)

PSA	Programm Pagos por Servicios Ambientales (Costa Rica)
RECs	Renewable Energy Certificates *Einspeisetarife*
REDD	Reducing Emissions from Deforestation and Degradation (UNFCCC) *Reduktion von Emissionen aus Entwaldung und Schädigung von Wäldern*
REEEP	Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership (UK) *Partnerschaft für erneuerbare Energien und Energieeffizienz*
RIL	Reduced-impact Logging *Holzerei mit reduzierter Auswirkung*
RSB	Roundtable on Sustainable Biofuels
RSPO	Roundtable on Sustainable Palmoil
RTRS	Roundtable on Responsible Soy Association (Schweiz)
SAFE	Silvorable Forestry for Europe Project
SAI	Social Accountability International *Internationale soziale Rechenschaft*
SAN	Sustainable Agriculture Network (Rainforest Alliance) *Netzwerk für Nachhaltige Landwirtschaft*
SBSTTA	Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice (CBD) *Nebenorgan für wissenschaftliche, technische und technologische Beratung der CBD*
SPS	Agreement on the Application of Sanitary and Phytosanitary Measures (WTO) *Übereinkommen über die Anwendung gesundheitspolizeilicher und pflanzenschutzrechtlicher Maßnahmen*
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
TBT	Agreement on Technical Barriers on Trade (GATT) *Übereinkommen über technische Handelshemmnisse*
THG	Treibhausgas
UNBI	United Nations/UNCTAD-Biofuels Initiative
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa *Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung in den von Dürre und/oder Wüstenbildung schwer betroffenen Ländern, insbesondere in Afrika*
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development *Konferenz für Handel und Entwicklung der Vereinten Nationen*
UNDP	United Nations Development Programme *Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen*
UNEP	United Nations Environment Programme *Umweltprogramm der Vereinten Nationen*
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change *Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen*
UNFF	United Nations Forum on Forests *Waldforum der Vereinten Nationen*
UNIDO	United Nations Industrial Development Organisation *Organisation der Vereinten Nationen für industrielle Entwicklung*
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WCMC	World Conservation Monitoring Centre
WCO	World Customs Organization *Weltzollvereinigung*
WFP	World Food Programme (UN) *Welternährungsprogramm der Vereinten Nationen*
WSSD	World Summit on Sustainable Development *Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung*
WTO	World Trade Organization *Welthandelsorganisation*
WWF	World Wide Fund for Nature

Zusammenfassung für Entscheidungsträger

Globale Bioenergiepolitik für eine nachhaltige Entwicklung: Das Leitbild des WBGU

Der beginnende globale Bioenergieboom ist Anlass für heftige und stark polarisierte Debatten. Dabei stehen unterschiedliche Motivationen wie eine verringerte Abhängigkeit von Öl- und Gasimporten oder die Nutzung von Biokraftstoffen zur CO_2-Emissionsminderung im Straßenverkehr im Vordergrund und prägen die politische Agenda. Befürworter argumentieren, dass die Bioenergie angesichts der dramatisch steigenden Energienachfrage zu einer gesicherten Energieversorgung und zum Klimaschutz beitragen sowie Entwicklungsmöglichkeiten vor allem in den ländlichen Räumen von Industrie- und Entwicklungsländern schaffen kann. Kritiker halten entgegen, dass durch den Anbau von Energiepflanzen Landnutzungskonflikte zwischen Ernährung, Naturschutz sowie Bioenergie zunehmen werden und negative Klimawirkungen wahrscheinlich sind. Aufgrund der großen Komplexität und Dynamik des Themas, des hohen Maßes an wissenschaftlicher Unsicherheit und der Vielzahl von Interessen ist es bisher nicht gelungen, eine integrierte Einschätzung der Bioenergie als Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung vorzunehmen. Der WBGU möchte zeigen, dass und wie eine nachhaltige Nutzung von Bioenergie möglich ist, die Chancen nutzt und gleichzeitig Risiken minimiert.

Dafür entwirft der Beirat ein integriertes Leitbild, das der Politik klare Orientierung für die Bioenergienutzung gibt. Richtschnur für diese erforderliche Weichenstellung muss nach Ansicht des WBGU die strategische Rolle der Bioenergie als Baustein in der globalen Energiewende zur Nachhaltigkeit sein. Das Leitbild richtet sich an zwei Zielen aus:

- *Erstens* soll die Bioenergienutzung einen Beitrag zum Klimaschutz leisten, indem sie fossile Energieträger ersetzt und somit hilft, die Treibhausgasemissionen im Weltenergiesystem zu reduzieren. Die Speicherbarkeit der Bioenergieträger und ihr Einsatz als Regelenergie können einen strategisch wichtigen Beitrag zur Stabilisierung der Stromversorgung bei einem hohen Anteil von Wind- und Solarenergie im Energiesystem von Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern leisten. Langfristig kann Bioenergie in Kombination mit Abscheidung und sicherer Einlagerung von CO_2 sogar dazu beitragen, der Atmosphäre einen Teil des emittierten CO_2 wieder zu entziehen.
- *Zweitens* kann Bioenergienutzung zur Überwindung der Energiearmut beitragen. Dabei geht es zunächst um die Überwindung der traditionellen und gesundheitsschädlichen Nutzungsformen der Bioenergie in Entwicklungsländern. Deren Modernisierung kann Armut reduzieren, Gesundheitsschäden vermeiden und den Nutzungsdruck auf natürliche Ökosysteme vermindern. Rund 2,5 Mrd. Menschen haben derzeit keinen Zugang zu bezahlbaren und sicheren Energieformen (z.B. Elektrizität, Gas) zur Deckung ihrer Grundbedürfnisse. Moderne, aber einfache und kostengünstige Bioenergieformen können einen wichtigen Beitrag leisten, um die Energiearmut in Entwicklungs- und Schwellenländern signifikant zu reduzieren.

Die zentrale Botschaft des WBGU lautet, dass die weltweit vorhandenen nachhaltigen Potenziale der Bioenergie genutzt werden sollten, solange Gefährdungen der Nachhaltigkeit ausgeschlossen werden können, insbesondere der Ernährungssicherheit sowie der Ziele von Natur- und Klimaschutz.

Um dieses anspruchsvolle Leitbild umzusetzen, muss die Politik ihre Gestaltungsaufgabe wahrnehmen. Dabei müssen Fehlentwicklungen vermieden werden, die eine sinnvolle Nutzung der Chancen gefährden. Durch die derzeitigen politischen Rahmensetzungen, z.B. falsche Anreize der Klimarahmenkonvention oder die Quotenvorgaben der Europäischen Union für Biokraftstoffe, werden zum Teil sogar Bioenergiepfade gefördert, die zur Verschärfung des Klimawandels beitragen. Gleichzeitig darf Bioenergie nicht über die Zunahme von Landnutzungskonkurrenzen zu einer Gefährdung der Ernährungssicherheit führen oder die Zerstörung von Regenwäldern oder anderen naturnahen Ökosystemen auslösen. Bei der Bewertung der Nutzung von Energiepflanzen müssen sowohl die direkten als

auch die indirekten Landnutzungsänderungen einbezogen werden, da sie einen entscheidenden Einfluss auf die Klimabilanz und die Risiken für biologische Vielfalt haben. Die Nutzung biogener Abfall- und Reststoffe birgt dagegen weitaus weniger Risiken für die Landnutzung.

Die zahllosen möglichen Bioenergienutzungspfade, deren unterschiedliche Eigenschaften und die globale Vernetzung ihrer Auswirkungen machen eine pauschale Bewertung unmöglich. Für die notwendige differenzierte Analyse verwendet der WBGU in seinem Hauptgutachten einen interdisziplinären, systemischen und globalen Blick auf die Bioenergie. Der Beirat entwickelt ein Analyseraster, indem er ökologische und sozioökonomische Nachhaltigkeitsanforderungen an eine Nutzung von Bioenergie definiert, unter Beachtung dieser Vorgaben eine neuartige globale Analyse ihrer Potenziale durchführt und schließlich mit Blick auf die Zielvorgaben und die Kosten eine Bewertung ausgewählter Nutzungspfade in Bezug auf Treibhausgasbilanz und ökologische Wirkungen entlang des gesamten Lebenszyklus vornimmt.

Auf dieser Basis entwickelt der Beirat Strategien, wie in Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern die Bioenergienutzung als Teil einer nachhaltigen Energieversorgung ausgestaltet werden kann. Dabei zeigt sich, dass die heute verwendeten modernen Bioenergieformen, insbesondere der Anbau einjähriger Energiepflanzen auf Ackerland zur Produktion von Flüssigkraftstoffen für den Verkehr, zu wenig an den Zielen der Nachhaltigkeit und des Klimaschutzes ausgerichtet sind. Vielmehr sollte den Nutzungspfaden, die aus Reststoffen oder mehrjährigen Energiepflanzen Strom und Wärme erzeugen, der Vorzug gegeben werden. Der WBGU plädiert daher für den raschen Ausstieg aus der Förderung von Biokraftstoffen im Verkehrsbereich mittels einer schrittweisen Rücknahme der Beimischungsquoten zu fossilen Kraftstoffen und stattdessen für einen Ausbau der Elektromobilität.

Bei Vorliegen geeigneter Rahmenbedingungen kann die nachhaltige Nutzung von Bioenergie aus Energiepflanzen bis etwa Mitte des Jahrhunderts eine wichtige Brückentechnologie für den Übergang in ein nachhaltiges Energiesystem sein. Bis dahin werden voraussichtlich Wind- und Solarenergie so stark anwachsen, dass sie in ausreichender Menge zur Verfügung stehen. Gleichzeitig werden die Anforderungen an die globale Landnutzung erheblich zugenommen haben, vor allem durch eine wachsende Weltbevölkerung mit zunehmend flächenintensiven Ernährungsmustern, durch den steigenden Flächenbedarf für die stoffliche Nutzung von Biomasse und nicht zuletzt durch die Auswirkungen des Klimawandels. Als Folge wird in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts voraussichtlich der Energiepflanzenanbau wieder zurückgehen müssen, während die Nutzung biogener Abfall- und Reststoffe weitergeführt werden kann. Angesichts dieser sich zuspitzenden Trends birgt das Problem konkurrierender Landnutzung künftiges Konfliktpotenzial, das über das Handlungsfeld der Bioenergie weit hinaus reicht. Daher wird globales Landnutzungsmanagement zu einer zentralen Zukunftsaufgabe der internationalen Politik und zur Voraussetzung für nachhaltige Bioenergiepolitik.

Zur Steuerung der Bioenergienutzung schlägt der WBGU einen globalen Regulierungsrahmen für eine nachhaltige Bioenergiepolitik vor, dessen wesentliche Elemente ein weiterentwickeltes UN-Klimaschutzregime mit korrigierten Anreizen, das Setzen von Nachhaltigkeitsstandards sowie flankierende Maßnahmen zur Sicherung der Nachhaltigkeit durch Stärkung und Weiterentwicklung internationaler Umwelt- und Entwicklungsregime (z.B. Biodiversitäts- und Desertifikationskonvention) sind. Innerhalb dieses Rahmens formuliert der Beirat Förderstrategien, um effiziente, innovative Technologien voranzubringen sowie Investitionen in notwendige Infrastrukturen zu verstärken und so zur Erreichung der beiden Ziele des Leitbilds beizutragen.

Die Entwicklungszusammenarbeit kann durch die Unterstützung länderspezifischer nachhaltiger Bioenergiestrategien dazu beitragen, das zukunftsfähige Bioenergiepotenzial in Entwicklungs- und Schwellenländern zu mobilisieren, die Energiearmut signifikant zu reduzieren und den Aufbau klimaverträglicher Energiesysteme zu stärken. Für Entwicklungsländer ist die Stärkung der Handlungskapazitäten (z.B. Governance-Kapazitäten zur Entwicklung und Umsetzung nachhaltiger Bioenergiepolitik, Monitoring-Kapazitäten zu Landnutzungskonflikten sowie anwendungsorientierte Forschung zu Bioenergie) eine wichtige Voraussetzung für den Einstieg in die moderne Bioenergienutzung. Zudem müssen hier Strategien für Bioenergie grundsätzlich mit Strategien zur Ernährungssicherung verknüpft werden. Dies gilt insbesondere für einkommensschwache Entwicklungsländer, die Nettoimporteure von Nahrungsmitteln sind.

Angesichts der großen Chancen und Risiken sowie der Komplexität ist Bioenergie in kurzer Zeit zu einer anspruchsvollen politischen Regulierungs- und Gestaltungsaufgabe geworden, die nur durch weltweite Kooperation und internationale Rahmensetzung gelöst werden kann. Der WBGU liefert mit dem vorliegenden Hauptgutachten Entscheidungshilfen auf dem Weg zu einer differenzierten und kohärenten globalen Bioenergiepolitik.

1
Heutige Nutzung und künftige Potenziale der Bioenergie

Für einen umfassenden Blick auf die Bioenergie ist es notwendig, über den engen Fokus des Anbaus von Energiepflanzen zur Erzeugung von Flüssigkraftstoffen für den Verkehr hinaus zu denken und die Gesamtpotenziale von Bioenergie zu betrachten. Nach Ansicht des WBGU ist für die Analyse der Bioenergienutzung eine Einteilung in folgende Handlungsfelder geeignet: (1) traditionelle Bioenergienutzung, (2) Nutzung biogener Abfall- und Reststoffe, (3) Anbau von Energiepflanzen.

Heutige Bioenergienutzung ist vor allem traditionelle Biomassenutzung

Moderne Bioenergie spielt heute mit ca. 10 % der globalen Bioenergienutzung nur eine kleine Rolle. Die viel diskutierten Biokraftstoffe für den Verkehr haben derzeit einen Anteil von lediglich 2,2 %, während der Löwenanteil der globalen Bioenergienutzung mit knapp 90 % (etwa 47 EJ pro Jahr) auf die traditionelle Bioenergie entfällt: Das ist etwa ein Zehntel des heutigen globalen Primärenergieeinsatzes. Dabei werden Holz, Holzkohle, biogene Reststoffe und Dung häufig auf ineffizienten Drei-Steine-Herden verfeuert. Etwa 38 % der Weltbevölkerung, meist in Entwicklungsländern, hängen von dieser gesundheitsschädlichen Energieform ab. Aufgrund der Schadstoffbelastung durch die offenen Feuer sterben pro Jahr über 1,5 Mio. Menschen. Durch einfache technische Verbesserungen der Herde kann die Gesundheitsgefährdung durch Biomassenutzung weitgehend vermieden und gleichzeitig die Effizienz um das Zwei- bis Vierfache gesteigert werden. Die Modernisierung der traditionellen Bioenergienutzung oder ihr Ersatz durch andere, möglichst erneuerbare Energieformen stellt daher einen großen und in der bioenergie- wie der entwicklungspolitischen Debatte vernachlässigten Hebel für die weltweite Armutsbekämpfung dar.

Nachhaltiges Potenzial biogener Abfall- und Reststoffe

Der WBGU schätzt das weltweite technische Potenzial aus biogenen Abfall- und Reststoffen auf etwa 80 EJ pro Jahr. Das nachhaltig nutzbare Potenzial ist u.a. zur Sicherung des Bodenschutzes bei nur ungefähr 50 EJ pro Jahr anzusetzen, wovon etwa die Hälfte wirtschaftlich umsetzbar sein könnte. Die wissenschaftliche Basis für Abschätzungen des nachhaltigen globalen Potenzials der Abfall- und Reststoffe ist nur sehr schmal, daher empfiehlt der WBGU weitere Untersuchungen zur genaueren Einschätzung.

Neue Modellierung des globalen nachhaltigen Potenzials von Energiepflanzen

Angesichts verfügbarer Potenzialabschätzungen, denen unterschiedliche Methoden zugrunde liegen und deren Ergebnisse weit streuen, hat der WBGU eine neuartige Analyse des globalen nachhaltigen Potenzials von Energiepflanzen vorgenommen. Für diese Abschätzung wurde ein dynamisches globales Vegetationsmodell verwendet. In Szenarien über die potenziell verfügbaren Flächen wurden systematisch die Nachhaltigkeitsanforderungen berücksichtigt, die aus Sicht des WBGU bei einer global integrierten Betrachtung erfüllt sein müssen. So wurden die künftigen Flächenanforderungen für Ernährungssicherung und Naturschutz abgeschätzt und die künftig notwendigen Flächen vom Energiepflanzenanbau ausgeschlossen. Ferner wurden die Flächen ausgeschlossen, bei denen die Treibhausgasemissionen durch die Umwandlung der Flächen in Ackerland erst nach mehr als zehn Jahren durch den aus der Atmosphäre aufgenommenen Kohlenstoff kompensiert würden, also vor allem Wälder und Feuchtgebiete. Außerdem wurden verschiedene Klima-, Emissions- und Bewässerungsszenarien untersucht. Allerdings ist der Einfluss dieser drei Faktoren gegenüber Ernährungssicherung und Naturschutz vergleichsweise gering. Insgesamt ergibt sich für das globale nachhaltige Potenzial aus Energiepflanzen aufgrund der unterschiedlichen Szenarien eine Bandbreite von 30–120 EJ pro Jahr.

In Abbildung 1 wird eines der Szenarien dargestellt, das eine durchschnittliche Potenzialabschätzung repräsentiert. Es ist das technische Potenzial abgebildet, das auf nachhaltige Weise produziert werden kann. Dieses Potenzial wird durch Wirtschaftlichkeitserwägungen und politische Rahmenbedingungen in den jeweiligen Weltregionen weiter eingeschränkt. Der WBGU hat daher eine Analyse der Regionen angeschlossen, in denen die Modellierung deutliche nachhaltige Bioenergiepotenziale ausweist. Zu den Voraussetzungen für eine rasche Realisierung dieser Potenziale gehören ein Minimum an Sicherheit und politischer Stabilität der Länder und Regionen, denn signifikante Investitionstätigkeiten in fragilen oder Bürgerkriegsstaaten sind nicht zu erwarten. Auch infrastrukturelle und logistische Kapazitäten sowie ein Mindestmaß an Regulierungskompetenz sind notwendig, um Nachhaltigkeitsanforderungen formulieren und durchsetzen zu können.

Vor diesem Hintergrund wurden fünf Regionen genauer betrachtet, da in den anderen Gebieten entweder die theoretischen Bioenergiepotenziale eher niedrig sind (z.B. Naher Osten und Nordafrika) oder die volkswirtschaftliche und staatliche Leistungsfä-

Abbildung 1
Potenzialregionen für Bioenergie mit Ländern, die von fragiler Staatlichkeit oder Staatszerfall betroffen sind. Die Karte zeigt die räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen im Jahr 2050 für ein WBGU-Szenario mit geringem Agrarflächenbedarf und hohem Biodiversitätsschutz im unbewässerten Anbau. Ein Pixel entspricht 0,5° x 0,5°. Zur Einschätzung der Realisierbarkeit der identifizierten nachhaltigen Bioenergiepotenziale wurde die Governance-Qualität einzelner Länder auf Grundlage des Failed State Index (FSI) herangezogen. Die hellrot gefärbten Länder haben einen FSI > 90, so dass dort kurz- bis mittelfristig kaum Chancen für eine Realisierung der Potenziale gesehen werden.
Quelle: WBGU unter Verwendung von Daten aus Beringer und Lucht, 2008 und von Foreign Policy, 2008

higkeit absehbar als gegeben betrachtet werden kann (z. B. Nordamerika, Europa). Wie die Modellierungsergebnisse zeigen, gibt es in tropischen und subtropischen Breiten beachtliche Potenziale für den nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen. Allein 8–25 EJ pro Jahr entfallen auf Mittel- und Südamerika. Im Vergleich der Regionen scheinen dort die Chancen zur Realisierung des nachhaltigen Bioenergiepotenzials auch aus politischen und wirtschaftlichen Gründen besonders groß zu sein. Gute Chancen zur Nutzung des nachhaltigen Potenzials in einer Größenordnung von 4–15 EJ pro Jahr bestehen außerdem in China und angrenzenden Ländern, denn auch dort könnten die dazu nötigen Investitionen getätigt und entsprechende Kapazitäten aufgebaut werden. Von beachtlicher Größe wäre auch das Potenzial auf dem indischen Subkontinent (2–4 EJ pro Jahr) und in Südostasien (1–11 EJ pro Jahr). Allerdings sind dort eine hohe Nutzungsdichte der Flächen und Risiken für die Ernährungssicherheit sowie Entwaldung und die Erhaltung biologischer Vielfalt besondere Herausforderungen. Eine Realisierung des Potenzials von insgesamt etwa 5–14 EJ pro Jahr in Afrika südlich der Sahara ist in vielen Ländern aufgrund von fragiler Staatlichkeit oder Staatszerfall unrealistisch. In afrikanischen Ländern mit besseren wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen sollten die Optionen für die Erschließung des Potenzials genauer untersucht werden.

Das nachhaltige Potenzial der Bioenergie ist signifikant!

Zusammen mit dem Potenzial aus Abfall- und Reststoffen (ca. 50 EJ pro Jahr) schätzt der WBGU das nachhaltige technische Potenzial der Bioenergie im Jahr 2050 auf insgesamt 80–170 EJ pro Jahr, was etwa im Bereich von einem Viertel des derzeitigen und unter einem Zehntel des in 2050 zu erwartenden globalen Primärenergieeinsatzes liegt. Diese Bandbreite stellt allerdings die Obergrenze dar, da ein Teil dieses technischen nachhaltigen Potenzials nicht umsetzbar sein wird, etwa weil wirtschaftliche Erwägungen dagegen sprechen oder weil es in politischen Krisengebieten liegt. Das wirtschaftlich mobilisierbare Potenzial könnte bei etwa der Hälfte des nachhaltigen technischen Potenzials liegen. Angesichts dieser Werte sollte die Bedeutung der Bioenergie nicht überschätzt werden, aber auch die erwartete Größenordnung ist signifikant und darf angesichts der strategischen Vorzüge der Bioenergie bei

der künftigen Entwicklung der Energiesysteme nicht vernachlässigt werden. Die Herausforderung für die Politik besteht darin, das nachhaltige und wirtschaftlich mobilisierbare Potenzial der Bioenergie auszuschöpfen und gleichzeitig durch geeignete Regulierung zu verhindern, dass Fehlentwicklungen eintreten oder Nachhaltigkeitsgrenzen verletzt werden.

2 Risiken und Fehlentwicklungen eines ungesteuerten Bioenergieausbaus

Den Potenzialen und Chancen stehen die Risiken einer ungesteuerten Bioenergieentwicklung gegenüber. Durch den vermehrten Anbau von Energiepflanzen wird eine weltweit rasant steigende Energienachfrage mit der globalen Landnutzung verkoppelt. Das verstärkt die Nachfrage nach ohnehin knapper werdenden landwirtschaftlichen Nutzflächen und lässt künftige Landnutzungskonflikte wahrscheinlicher werden. Es gibt Ökosystemleistungen und Produkte, die untrennbar mit der Landnutzung und der Erzeugung von Biomasse verknüpft sind und nicht substituiert werden können. Dies betrifft z.B. die Erhaltung biologischer Vielfalt, die Stoffkreisläufe, die Biomasse als Nahrungs- und Futtermittel sowie teils auch die stoffliche Nutzung von Biomasse. Dagegen kann erneuerbare Energie auch auf Wegen bereitgestellt werden, die kaum Landnutzungskonflikte auslösen, etwa mittels Wind- oder Solarenergie. Risiken entstehen dann, wenn durch den Anbau von Energiepflanzen direkte oder indirekte Landnutzungskonkurrenzen ausgelöst oder verschärft werden, so dass nicht substituierbare Nutzungen der Biomasse verdrängt und damit gefährdet werden. Bei der Potenzialanalyse des WBGU wurden diese Risiken zwar bereits berücksichtigt, aber in der praktischen Mobilisierung dieses Potenzials ist ihre Vermeidung eine große Herausforderung für eine nachhaltige Bioenergiepolitik.

Risiken für die Ernährungssicherheit

Um den Nahrungsbedarf einer wachsenden Weltbevölkerung zu decken, muss die globale Nahrungsmittelproduktion bis 2030 um rund 50 % gesteigert werden. Der künftige Flächenbedarf für die Nahrungsmittelproduktion wird dabei nicht zuletzt durch den flächenintensiven Ernährungsstil in den Industrieländern bestimmt, der sich zunehmend auf die Wachstumsregionen aufstrebender Volkswirtschaften, wie z.B. China, ausbreitet. Diese Nachfrage wird sich nur zum Teil durch eine Erhöhung der Flächenproduktivität decken lassen, so dass die Agrarflächen für Ernährung laut FAO bis 2030 um 13 % ausgeweitet werden müssen. Daher ist künftig mit einer deutlichen Verschärfung der Landnutzungskonkurrenz und demzufolge im Trend mit steigenden Nahrungsmittelpreisen zu rechnen. Eine signifikante Zunahme des Energiepflanzenanbaus führt zudem zu einer engen Kopplung von Energie- und Nahrungsmittelmärkten. Dadurch werden künftig die Nahrungsmittelpreise mit Dynamiken auf den Energiemärkten verknüpft, so dass politische Krisen im Energiesektor auch auf die Nahrungsmittelpreise durchschlagen würden. Für die etwa 1 Mrd. Menschen, die weltweit in absoluter Armut leben, ergeben sich aus diesen Zusammenhängen zusätzliche Risiken für die Ernährungssicherheit, die von der Politik berücksichtigt werden müssen.

Risiken für die biologische Vielfalt

Die durch den Ausbau der Bioenergienutzung insgesamt verstärkte Nachfrage nach Agrarprodukten kann durch die Intensivierung bestehender Produktionssysteme erreicht werden, wodurch die biologische Vielfalt auf den bewirtschafteten Flächen leidet. Die andere Option ist die Erschließung neuer Ackerflächen auf Kosten natürlicher Ökosysteme, was derzeit als wichtigster Treiber für die aktuelle globale Krise der biologischen Vielfalt gilt. Dies kann auf direkte Weise geschehen, indem beispielsweise tropische Wälder gerodet und die Flächen für Energiepflanzen genutzt werden. Schwieriger zu fassen sind die indirekt ausgelösten Landnutzungsänderungen: Wenn Ackerflächen auf den Anbau von Energiepflanzen umgestellt werden, muss die auf diesen Flächen vorher erzielte Agrarproduktion auf andere Flächen ausweichen. Über den Weltmarkt für Agrargüter erhalten diese indirekten Verdrängungseffekte häufig eine internationale Dimension. Eine ungesteuerte Ausweitung des Energiepflanzenanbaus würde den Verlust biologischer Vielfalt zusätzlich verstärken.

Risiken für den Klimaschutz

Die Umwandlung natürlicher Ökosysteme in neue Anbauflächen setzt Treibhausgase frei. Es hängt entscheidend von den Landnutzungsänderungen ab, ob und welche Treibhausgaseinsparungen durch die Nutzung von Bioenergie aus Energiepflanzen erreichbar sind. Emissionen, die beim Umbruch von Ökosystemen mit hohem Kohlenstoffanteil entstehen (etwa Wälder und Feuchtgebiete, z.T. auch natürliche Grasländer), zerstören in der Regel die Klimaschutzwirkung der Bioenergienutzung. Die Nutzung von Energiepflanzen kann dann sogar zu einer Verschärfung des Klimawandels beitragen. Bei der Klimabilanz von Bioenergie müssen daher sowohl die direkten als auch die indirekten Landnutzungsänderungen berücksichtigt werden.

Risiken für Boden und Wasser
Bioenergiepfade, bei denen einjährige Energiepflanzen auf Ackerland angebaut werden, sind zu wenig an den Zielen des Bodenschutzes ausgerichtet. Dagegen können einige der mehrjährigen Anbausysteme sogar zur Restaurierung degradierter Flächen beitragen. Ob die Kultivierung von Energiepflanzen aus Sicht des Bodenschutzes akzeptabel ist, hängt zudem von den regionalen agroökologischen Bedingungen ab. Auch die Entnahme von Reststoffen aus land- oder forstwirtschaftlichen Ökosystemen darf nur eingeschränkt erfolgen, da sonst dem Boden zu viel organische Substanz und mineralische Nährstoffe entzogen würden. Eine ungesteuerte Ausweitung des Energiepflanzenanbaus und nicht angepasste Anbausysteme können zudem den Nutzungsdruck auf die verfügbaren Wasserressourcen stark erhöhen. Energiepflanzen sind neue Triebkräfte im Landnutzungssektor, die künftig möglicherweise große, derzeit aber kaum untersuchte Auswirkungen auf die Wassernutzung haben können.

3 Nachhaltige Bioenergiepfade: Ergebnisse des WBGU

Der WBGU untersucht auf Basis der beiden Ziele des Leitbilds eine Reihe wichtiger Bioenergiepfade. Es ergibt sich nur dann eine Klimaschutzwirkung durch die Nutzung von Bioenergie, wenn die insgesamt durch Landnutzungsänderungen sowie Anbau und Nutzung der Biomasse entstehenden Treibhausgasemissionen geringer sind als diejenigen Emissionen, die bei der Nutzung fossiler Energieträger entstünden. Ein Beitrag zur Überwindung der Energiearmut wird vor allem dann geleistet, wenn durch lokal angepasste Technologie die Vorteile der Bioenergie ausgespielt werden: Sie kann ohne großen finanziellen oder technischen Aufwand dezentral speicherbare Energie zur Verfügung stellen.

Produktion von Biomasse für die energetische Nutzung: Was ist zu beachten?

Bei der Produktion von Biomasse für die energetische Verwendung muss zwischen Abfall- und Reststoffen sowie Energiepflanzen unterschieden werden.

Priorität für die Nutzung von Abfall- und Reststoffen
Die Nutzung von biogenen Abfall- und Reststoffen hat den Vorteil, dass kaum Konkurrenzen zu bestehender Landnutzung auftreten. Die Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderungen und Anbau entfallen, so dass sich die Klimaschutzwirkung im Wesentlichen aus der Konversion in Bioenergieträger und deren Anwendung im Energiesystem ergibt. Die Sicherung des Bodenschutzes – und damit auch des Klimaschutzes – bei der Reststoffnutzung sowie die Vermeidung von Schadstoffemissionen müssen dabei gewährleistet sein. Insgesamt räumt der WBGU der energetischen Verwertung von biogenem Abfall (einschließlich Kaskadennutzung) sowie Reststoffen grundsätzlich eine höhere Priorität ein als der Nutzung von Energiepflanzen.

Landflächen für den Energiepflanzenanbau
Bei der Nutzung eigens angebauter Energiepflanzen ist die Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen unverzichtbar. Während Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen über Standardwerte quantifiziert werden können, ist dies bei indirekten Landnutzungsänderungen mit großen Unsicherheiten verbunden. Der WBGU verwendet eine vorläufige Methode für die Berechnung der indirekten Effekte, die eine erste grobe Einschätzung erlaubt.

Der Beirat lehnt die direkte wie indirekte Umwandlung von Waldflächen und Feuchtgebieten in Agrarland für Energiepflanzen grundsätzlich ab, da sie in der Regel mit nicht kompensierbaren Treibhausgasemissionen verbunden sowie für die biologische Vielfalt und die Kohlenstoffspeicherung im Boden grundsätzlich negativ zu bewerten ist. Der Energiepflanzenanbau sollte auf solche Flächen beschränkt werden, deren Umnutzung für die Bioenergieproduktion indirekte Landnutzungsänderungen möglichst vermeidet. Die durch den Anbau insgesamt entstehenden Treibhausgasemissionen sollten die CO_2-Menge nicht überschreiten, die auf der entsprechenden Fläche innerhalb von 10 Jahren durch den Energiepflanzenanbau wieder fixiert werden kann.

Der Biomasseanbau auf marginalen Flächen (also Flächen mit eingeschränkter Produktions- oder Regelungsfunktion) hat den großen Vorteil, dass dadurch nur wenig Landnutzungskonkurrenzen etwa mit der Ernährungssicherung zu erwarten sind und daher auch kaum indirekte Landnutzungsänderungen ausgelöst werden. Der WBGU kommt daher zu dem Schluss, dass vor allem auf marginalem Land der Anbau von Energiepflanzen zu fördern ist, sofern die Interessen lokaler Bevölkerungsgruppen berücksichtigt werden und eine vorherige Bewertung des Naturschutzwerts erfolgt.

Anbausysteme für Energiepflanzen
Als Kriterien für die Nachhaltigkeit von Anbausystemen verwendet der WBGU vor allem die Wirkungen auf die biologische Vielfalt und die Kohlenstoffspei-

cherung im Boden. Bioenergie ist nur dann als nachhaltige Energie zu bezeichnen, wenn auf den Ernteflächen dauerhaft so viel Biomasse nachwächst, wie energetisch genutzt wird, wenn also die Bodenfruchtbarkeit langfristig gesichert werden kann. Nur unter dieser Voraussetzung ist auch die Annahme berechtigt, dass der von den Energiepflanzen aus der Atmosphäre aufgenommene und gespeicherte Kohlenstoff, der bei der energetischen Nutzung in Form von CO_2 wieder freigesetzt wird, nicht zu einem Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration führt und daher nicht als Emission betrachtet werden muss. Zusätzlich müssen die unterschiedlichen Flächenerträge berücksichtigt werden. Nach diesen Maßgaben schneiden mehrjährige Anbaukulturen wie *Jatropha*, Ölpalmen, Kurzumtriebsplantagen (schnellwachsende Hölzer) und Energiegräser besser ab als einjährige Anbaukulturen wie Raps, Getreide oder Mais und sind daher grundsätzlich zu bevorzugen. Bei Auswahl geeigneter Anbausysteme kann zusätzlich organischer Kohlenstoff in den Boden eingetragen werden, was sowohl die Treibhausgasbilanz als auch die Bodenfruchtbarkeit verbessert.

Wandlung, Anwendung und Einbindung in die Energiesysteme: Wie kann Bioenergie am besten genutzt werden?

Auf die Klimaschutzwirkung haben nach der Bereitstellung der Biomasse sowohl die Art der Umwandlung von Biomasse in anwendbare Produkte wie z.B. Gase, Pflanzenöle, Biokraftstoffe oder Holzpellets als auch die Art der Anwendung und Einbindung in die Energiesysteme, etwa in der Mobilität, in der Wärme- oder in der Stromerzeugung, einen wichtigen Einfluss. Dieser fällt allerdings in der Regel weniger ins Gewicht als die Wirkung durch direkte wie indirekte Landnutzungsänderungen beim Anbau von Energiepflanzen. Es ist vor allem entscheidend, welche Energieträger durch die Biomasse ersetzt werden und wie groß die energetischen Verluste im Konversionspfad sind. In Industrieländern und auch in sich rasch entwickelnden urbanen und industrialisierten Regionen von Schwellen- sowie teils auch Entwicklungsländern soll sich die Nutzung der Bioenergie an der Klimaschutzwirkung ausrichten. Für die Überwindung der Energiearmut geht es um die Modernisierung der traditionellen Bioenergienutzung und um den Zugang zu modernen Energieformen wie Strom und Gas. Beides sind Herausforderungen, die vor allem in den ländlichen Regionen von Entwicklungsländern im Vordergrund stehen. Auch in diesem Umfeld kann mit Bioenergie eine positive Klimaschutzwirkung erzielt werden.

Klimaschutz

Für den Klimaschutz erscheinen diejenigen Anwendungsbereiche der Bioenergie am attraktivsten, bei denen fossile Energieträger mit hohen CO_2-Emissionen substituiert werden, also vor allem Kohle.

Dabei sind die Treibhausgasminderungen, die mit verschiedenen Konversionspfaden zur Stromerzeugung wie der Mitverbrennung im Kohle- bzw. Heizkraftwerk, der Nutzung von Biogas aus der Vergärung und Rohgas aus der Vergasung in Blockheizkraftwerken (BHKW), oder dem Einsatz von Biomethan in BHKW oder Gas-und-Dampfkraftwerken (GuD) erreichbar sind, zunächst in etwa vergleichbar. Eine höhere Klimaschutzwirkung lässt sich beim Einsatz von Biomethan allerdings dann erzielen, wenn das beim Herstellungsprozess ohnehin abzutrennende CO_2 sicher deponiert werden kann. Die Verstromung von Biomasse hat den zusätzlichen Vorteil, dass sie anders als flüssige Biokraftstoffe für den Verkehr den Weg in die Elektromobilität erleichtert. Die heutigen Vermeidungskosten dieser Pfade unterscheiden sich stark: Während etwa die einfache Mitverbrennung fester Biomasse oder die Nutzung von Biogas oder Biomethan aus Vergärung bereits heute kosteneffiziente Klimaschutzoption sind, ist dies bei Vergasungstechnologien noch nicht der Fall. Eine deutliche Kostenreduktion ist hier aber zu erwarten. Die Verwendung von Biomethan ist auch aus technologischen und systemischen Gründen besonders attraktiv, da es sich über Erdgasnetze sammeln bzw. verteilen und in BHKW bzw. GuD-Anlagen mit hoher Effizienz am Ort des Bedarfs verstromen lässt. Für Industrieländer ist der Biomethanweg heute schon zu empfehlen und für industrialisierte Regionen in Schwellen- und Entwicklungsländern eine interessante Zukunftsoption.

Wegen ihres hohen energetischen Wirkungsgrads ist die Technik der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) der reinen Stromproduktion vorzuziehen, sofern die Nachfrage nach der Wärme gegeben ist. In Regionen mit hohem Kühlbedarf lässt sich die KWK auch zur Kälteerzeugung einsetzen, was auch für viele Entwicklungs- und Schwellenländer interessant ist. Das Treibhausgasminderungspotenzial der Bioenergienutzung zur ausschließlichen Wärmerzeugung (z.B. Pelletheizungen) ist bei eher hohen Vermeidungskosten nur etwa halb so groß wie die Minderungen im Strombereich, so dass diese Nutzung nur übergangsweise bei fehlenden alternativen erneuerbaren Energien sinnvoll erscheint. Mit dem zunehmend höheren Anteil der Direkterzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien (z.B. Wind, Sonne) verbessert sich die energetische Gesamteffizienz elektrischer Wärmepumpen in Zukunft deutlich, so dass sie mittelfristig eine Alternative zur Wärmeerzeugung darstellen. Insgesamt sind KWK-Pfade sowohl den

reinen Strom- als auch den reinen Wärmenutzungspfaden grundsätzlich vorzuziehen.

Für den Klimaschutz schneiden die Biokraftstoffe der ersten Generation, bei denen auf Ackerland mit temperaten, einjährigen Anbaukulturen gearbeitet wird (z.B. Biodiesel aus Raps oder Bioethanol aus Mais) sehr ungünstig ab. Unter Berücksichtigung der Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen führen sie in der Regel sogar zu höheren Emissionen als die Nutzung fossiler Kraftstoffe. Bei Verwendung von Reststoffen (z.B. Restholz, Gülle, Stroh) ist die Klimabilanz zwar positiv, aber die Treibhausgaseinsparung nur etwa halb so groß wie bei Anwendungen im Strombereich. Auch Biokraftstoffe der zweiten Generation schneiden hier nicht grundsätzlich besser ab.

Anders ist dies bei der Nutzung mehrjähriger tropischer Pflanzen wie *Jatropha*, Zuckerrohr oder Ölpalmen, die auf degradiertem Land angebaut werden und dort zu einer Kohlenstoffspeicherung im Boden führen. In diesem Fall kann die Klimaschutzwirkung bei geringen Kosten sehr hoch sein. Werden dieselben Pflanzen allerdings auf frisch gerodeten Flächen oder auf Ackerland angebaut und verursachen so direkte oder indirekte Landnutzungsänderungen, so schlägt die Klimabilanz ins negative, so dass z.T. erhebliche Mehremissionen gegenüber fossilen Kraftstoffen entstehen. Die Sicherung der Nachhaltigkeit beim Anbau der Energiepflanzen ist daher der entscheidende Faktor für die Beurteilung der Klimaschutzwirkung dieser Pfade.

Da es heute noch keine etablierten Nachhaltigkeitsstandards für Biokraftstoffe gibt, sind Import und Nutzung problematisch. Nach Einführung entsprechender Mindeststandards kann der Import von Pflanzenölen und Bioethanol beispielsweise aus tropischer Produktion für Strom- und Wärmeanwendungen sinnvoll sein. Für die Übergangszeit sollte jedoch jegliche Förderung von solchen Biokraftstoffen, die dem angestrebten Mindeststandard nicht genügen, unterlassen werden.

Für die Zukunft der Mobilität im Straßenverkehr hält der WBGU die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Kombination mit elektrischen Fahrzeugen für die sinnvollste Lösung. Auf diesem Weg erzielt die Bioenergienutzung eine deutlich höhere Klimaschutzwirkung als beigemischte Biokraftstoffe. Bei großskaliger Einführung elektrischer Fahrzeuge lassen sich die Kosten innerhalb von 15–20 Jahren voraussichtlich drastisch reduzieren, so dass sich auch die heute noch sehr hohen Treibhausgasvermeidungskosten verringern dürften. Durch Verwendung intelligenter Stromnetze kann die Elektromobilität zudem einen Beitrag als Regelenergie zur Stabilisierung elektrischer Netze leisten. Der WBGU empfiehlt den raschen Ausstieg aus der Förderung von Biokraftstoffen für den Verkehr. Die Quoten zur Beimischung von Biokraftstoffen zu fossilen Kraftstoffen sollten eingefroren und innerhalb der nächsten drei bis vier Jahre ganz zurückgenommen werden.

Insgesamt könnten durch die Substitution fossiler Energieträger mit Bioenergie unter Ausnutzung des vom WBGU abgeschätzten nachhaltigen Bioenergiepotenzials Treibhausgasminderungen von global 2–5 Gt CO_2eq pro Jahr erreicht werden. Dazu müsste allerdings die gesamte Biomasse so eingesetzt werden, dass die Treibhausgasreduktion 60 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse beträgt. Dies entspricht etwa einer Verdopplung der Klimaschutzanforderungen, wie sie gegenwärtig in der EU für den Biokraftstoffbereich in der Diskussion sind. Der WBGU schlägt diesen Wert als notwendige Voraussetzung für eine Förderung der Bioenergienutzung vor. Bei sehr optimistischen Annahmen könnte eine Treibhausgasminderung von bis zu 4–9 Gt CO_2eq pro Jahr erreicht werden. Zum Vergleich: Gegenwärtig betragen die globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen ca. 50 Gt CO_2eq pro Jahr und ein hypothetischer Stopp der globalen Entwaldung würde diese Emissionen um bis zu 8 Gt CO_2eq senken.

Abgesehen von solchen Bioenergiepfaden, die mit der Nutzung marginaler Flächen in den Tropen einhergehen oder auf etablierten Technologien wie der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken oder Produktion von Biogas durch Vergärung beruhen, lagen die Treibhausgasvermeidungskosten vieler Bioenergiepfade im Jahr 2005 deutlich oberhalb von 60 € pro t CO_2eq und sind damit aus Sicht des WBGU als derzeit nicht kosteneffiziente Klimaschutzoptionen einzuschätzen.

Daher muss vor allem der Energiepflanzenanbau jeweils sorgfältig mit anderen Klimaschutzoptionen, etwa vermiedener Entwaldung oder Aufforstung, abgewogen werden. Vor allem sollte er nicht dazu führen, die politisch sehr aufwändigen Bemühungen zur Reduktion der Emissionen aus Entwaldung zu unterminieren.

Kombiniert man die Nutzung des nachhaltigen Bioenergiepotenzials mit der Abscheidung und sicheren Einlagerung von CO_2, so können sogar „negative CO_2-Emissionen“ erzeugt werden. Der Atmosphäre können auf diesem Weg etwa 0,2 ppm CO_2 pro Jahr entzogen werden, was etwa einem Zehntel des derzeitigen jährlichen Anstiegs der CO_2-Konzentration entspricht. Daher kann selbst innerhalb langer Zeiträume mit dieser Technik nur ein relativ kleiner Teil der anthropogen verursachten Erhöhung der CO_2-Konzentration rückgängig gemacht werden.

Solange ein globales System verpflichtender Begrenzungen von Treibhausgasemissionen noch nicht installiert ist, das alle relevanten Quellen

umfasst, empfiehlt der WBGU, Emissionsstandards für Bioenergie einzuführen.

Überwindung der Energiearmut

Die Überwindung der Energiearmut ist vor allem in den ländlichen Regionen, teilweise aber auch in urbanen Räumen der Entwicklungsländer, eine entscheidende Voraussetzung für die Armutsbekämpfung. Als ersten Schritt empfiehlt der WBGU, den vollständigen Ausstieg aus den gesundheitsschädlichen Formen der traditionellen Bioenergienutzung bis 2030 als internationale Zielsetzung anzustreben.

Dazu können einige Technologien bereits heute schnell und kostengünstig eingesetzt werden. Mit dem Einsatz verbesserter Kochherde kann der Brennstoffverbrauch auf die Hälfte bis zu einem Viertel verringert und gleichzeitig die Gesundheitsgefährdung drastisch reduziert werden. Auch dezentrale, kleine Biogasanlagen für Rest- und Abfallstoffe sowie die Ölpflanzenproduktion auf marginalem Land für die Erzeugung von Strom und mechanischer Energie oder zur Beleuchtung sollten verstärkt gefördert werden. Diese Technologien leisten zudem einen Beitrag zur Verminderung des Nutzungsdrucks auf natürliche Ökosysteme sowie zur Armutsreduktion, da sich der Zeit- und Kostenaufwand für die Beschaffung des Brennmaterials deutlich vermindert. Sie bieten einen großen Hebel, um in kurzer Zeit und kostengünstig die Lebensqualität vieler hundert Millionen Menschen deutlich zu verbessern. Wichtig ist, in allen Schritten bei der Entwicklungszusammenarbeit sicherzustellen, dass die Technologien angenommen werden und selbst gewartet werden können.

Auf dem weiteren Weg zur Reduzierung der Energiearmut steht der Zugang zu modernen Energieformen im Vordergrund, vor allem zu Elektrizität und Gas. Dazu kann in Entwicklungsländern moderne Bioenergienutzung mittlerer Größe zur Stromerzeugung in KWK- oder Vergasungsanlagen ein wichtiger Baustein sein, vor allem wenn Biomasse z. B. aus Reststoffen oder von Holzplantagen auf marginalem Land verwendet wird. Der Einsatz flüssiger Biokraftstoffe für den stationären Einsatz (z. B. Stromerzeugung, Wasserpumpen, Kochen) kann in ländlichen Regionen von Entwicklungsländern sinnvoll sein, wenn sie etwa aufgrund ihrer Lage infrastrukturell benachteiligt sind.

Die größerskalige, moderne Bioenergieproduktion und -nutzung, die ebenfalls zur Bekämpfung der Energiearmut in Entwicklungsländern beitragen kann, sollte grundsätzlich auch unter dem Aspekt der Klimaschutzwirkung betrachtet werden. Bei günstigen Treibhausgasvermeidungskosten der jeweiligen Bioenergiepfade können über internationale Klimaschutzinstrumente neue Finanzierungsquellen erschlossen werden.

Energiepflanzen als Brückentechnologie

Die nachhaltige Nutzung von Bioenergie aus Energiepflanzen kann aus zwei Gründen nur bis etwa Mitte des Jahrhunderts eine wichtige Brückentechnologie für den Übergang von den bestehenden fossilen Energiesystemen in eine Energiezukunft mit überwiegendem Anteil an Wind- und Solarenergie sein.

Erstens werden in den nächsten Jahrzehnten durch dynamische Trends wie eine wachsende Weltbevölkerung mit zunehmend flächenintensiven Ernährungsmustern, verstärkter Bodendegradation sowie Wasserknappheit die Anforderungen an die globale Landnutzung massiv steigen. Zudem werden auch aus Klimaschutzgründen die petrochemischen Produkte künftig zunehmend aus Biomasse hergestellt werden. Der nicht substituierbare Landnutzungsbedarf für die Herstellung von Textilien, chemischen Produkten, Kunststoffen usw. dürfte bei rund 10 % der Weltagrarfläche liegen, wobei ein Teil der auf Biomasse basierenden Produkte nach ihrer Nutzung in Form von biogenem Abfall einer energetischen Verwertung zugeführt werden kann („Kaskadennutzung“). Diese steigenden Anforderungen an die Landnutzung vollziehen sich vor dem Hintergrund eines sich zunehmend manifestierenden anthropogenen Klimawandels. Daher wird vermutlich in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts der Energiepflanzenanbau wieder zurückgehen müssen.

Zweitens wird erneuerbare Energie in Form von Elektrizität in den kommenden Jahrzehnten zunehmend durch Wind- und Wasserkraft direkt erzeugt, ab Mitte des Jahrhunderts auch in großem Stil durch Solarenergie, so dass Energiepflanzen als Energieträger weitgehend ihre Brückenfunktion in eine nachhaltige Energieversorgung erfüllt haben werden. Der Sockel an Bioenergienutzung aus biogenen Reststoffen und Abfällen bleibt davon unberührt. Gemeinsam mit der Restnutzung fossiler Energieträger bekommen sie zunehmend die Aufgabe, als Regelenergie die Leistungsschwankungen von direkt erzeugtem Strom aus erneuerbaren Energien auszugleichen. In Verbindung mit intelligenten Stromnetzen kann auch die Elektromobilität einen wichtigen Beitrag zur Regelenergie leisten.

4 Forschungsempfehlungen für eine nachhaltige Bioenergienutzung

Auch wenn der WBGU mit diesem Gutachten bereits in Teilbereichen einen gangbaren Korridor für eine nachhaltige Bioenergienutzung ausweisen kann, bleiben Wissensdefizite, die durch weitere Forschung

beseitigt werden müssen. Der WBGU sieht besonderen Forschungsbedarf in sechs Bereichen:

1. *Verbesserung der wissenschaftlichen Grundlagen zur globalen Landnutzung:* Um die wissenschaftlichen Grundlagen für den Aufbau eines durch ein Geographisches Informationssystem (GIS) gestützten Landkatasters zu schaffen, müssen der Zustand der globalen Landnutzung und Landbedeckung sowie die Dynamik globaler Landnutzungsänderungen genauer als bisher beobachtet und bewertet werden. Dazu ist u.a. die Erhebung von hochaufgelösten Daten über Vegetationsbedeckung, Wasserhaushalt und Bodenzustand, landwirtschaftliche Nutzung und Bodenversiegelung in den einzelnen Weltregionen erforderlich.
2. *Bestimmung genauerer Treibhausgasbilanzen verschiedener Nutzungspfade der Bioenergie:* Die Treibhausgasbilanz ist die entscheidende Größe, die über den klimapolitischen Nutzen (oder in manchen Fällen Schaden) einer bestimmten Bioenergienutzung entscheidet. Sie lässt sich bislang nur ungenau bestimmen, z.B. was indirekt verursachte Emissionen durch Verdrängung bisheriger Landnutzung auf andere Flächen betrifft.
3. *Bestimmung des Potenzials, der Treibhausgasbilanzen und der wirtschaftlichen Nutzungspfade der Verwertung von Reststoffen:* Reststoffe u.a. aus Land- und Forstwirtschaft stellen ein noch kaum genutztes Potenzial zur Energieerzeugung dar, dessen künftige Nutzungsmöglichkeiten erforscht werden sollten.
4. *Analyse der Rolle der Bioenergie in einem Energiesystem der Zukunft (national, regional, global):* Die strategische Bedeutung und Einbindung von Bioenergie in jeweilige Energiesysteme (z.B. als Regelenergie) sollte näher untersucht werden. Dies ist mit entscheidend für die Wahl der bevorzugten Nutzungspfade.
5. *Klärung der Zusammenhänge zwischen Ernährungssicherung und Bioenergie:* Die komplexen lokalen, nationalen und globalen Wirkungsketten zwischen Bioenergienutzung und Ernährungssicherung sollten aus sozioökonomischer Perspektive dringend erforscht werden. Dabei sollten geopolitische Aspekte berücksichtigt werden: Könnte in einem Weltenergiesystem, in dem Bioenergie eine wesentliche Komponente darstellt, das „Primat der Sicherung der Energieversorgung“ der westlichen Welt und anderer mächtiger politischer Akteure dazu führen, Ernährungsprobleme in armen und politisch wenig einflussreichen Ländern zu verschärfen? Wie ließen sich solche Szenarien durch internationale Kooperationsvereinbarungen verhindern?
6. *Analyse internationaler Landnutzungskonkurrenzen und Entwicklung von Elementen eines globalen Landnutzungsmanagementsystems:* Land wird in den kommenden Dekaden aufgrund unterschiedlicher Treiber weltweit zu einem knappen Gut. Damit wird Landnutzung zu einem Gegenstand von Global Governance. Die Forschung sollte Interessenstrukturen im Bereich der weltweiten Landnutzung untersuchen und Beiträge zum Aufbau eines wirksamen globalen Regelwerkes zum Management von Landressourcen und zur Vermeidung von Landnutzungskonflikten leisten.

5 Handlungsempfehlungen: Bausteine einer nachhaltigen Bioenergiepolitik

Der Wettbewerb zwischen Biomasse als Rohstoff für die Energieerzeugung und dem Anbau von Nahrungsmitteln auf knapper werdenden Anbauflächen verbindet die beiden zentralen Grundlagen menschlicher Gesellschaften: Energie und Nahrung. Die Systemperspektive macht zudem deutlich, dass die sich neu konstituierende Bioenergiepolitik nicht nur komplexe Fragen der Energie-, Landwirtschafts- und Klimapolitik umfasst. Vielmehr spielen auch Verkehrs-, Außenwirtschafts- und Umweltpolitik sowie Entwicklungs- und Sicherheitspolitik eine wichtige Rolle. Weil nicht nachhaltige Bioenergiestrategien dem Klima schaden, Ernährungsprobleme verschärfen und Landnutzungskonflikte beschleunigen können, muss die Politik quer über die genannten Politikfelder Rahmenbedingungen setzten. Darüber hinaus kann Bioenergiepolitik nicht allein im nationalen Kontext gestaltet werden, sondern erfordert kollektives grenzüberschreitendes Handeln im Sinne einer effektiven Mehrebenenpolitik. Um die Bioenergienutzung auf Nachhaltigkeit auszurichten, sind also komplexe politische Gestaltungsaufgaben zu bewältigen, die für eine überwiegend nach dem Ressortprinzip organisierte Politik eine große Herausforderung darstellen: Konkurrierende Ziele müssen national wie weltweit ausbalanciert werden.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen und angesichts der Dringlichkeit des globalen Umsteuerns entwickelt der WBGU einen differenzierten politischen Instrumentenmix für eine nachhaltige globale Bioenergiepolitik. Den erheblichen Risiken beim Energiepflanzenanbau für den Klimaschutz sowie durch Landnutzungskonkurrenzen muss durch institutionelle Regelungen begegnet werden. Dazu muss zunächst sichergestellt werden, dass der Ausbau der Bioenergienutzung einen Beitrag zum Klimaschutz leistet. Die Anrechnungsverfahren im Rahmen des UN-Klimaschutzregimes müssen so angepasst werden, dass die Anreize zu einer für den Klimaschutz

kontraproduktiven Bioenergiepolitik entfallen. Da dies keine kurzfristige Wirkung entfaltet und die Einhaltung weiterer Nachhaltigkeitsdimensionen (Ernährungssicherung, Erhalt biologischer Vielfalt usw.) nicht sicherstellen kann, müssen gleichzeitig Bioenergiestandards erarbeitet und angewandt werden. Der WBGU schlägt einen anspruchsvollen Mindeststandard in Kombination mit zusätzlichen Förderkriterien vor. Darüber hinaus sind flankierende Maßnahmen zur Sicherung der globalen Nahrungsmittelproduktion und der biologischen Vielfalt sowie des Wasser- und Bodenschutzes erforderlich. Dazu können bestehende UN-Institutionen wie z.B. die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation (FAO), die Biodiversitätskonvention (CBD) und die Desertifikationskonvention (UNCCD) Beiträge leisten. Abschließend wird bewertet, welche Nutzungsformen der Bioenergie explizit durch nationale Politiken und internationale Entwicklungszusammenarbeit gefördert werden sollen.

5.1 Bioenergie konsistent in die internationale Klimaschutzpolitik einbinden

Anrechnungsverfahren für CO_2-Emissionen durch Bioenergie grundlegend reformieren

Die bestehenden Regelungen in der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) und im Kioto-Protokoll führen zu einer verzerrten Darstellung des Klimaschutzbeitrags von Bioenergie und zu Fehlanreizen in Bezug auf Bioenergieproduktion und -nutzung bis hin zur Förderung klimaschädlicher Bioenergienutzung. Der WBGU hält daher die Korrektur der Anrechnungsmodalitäten für die Verpflichtungen im Rahmen des Kioto-Protokolls bzw. seiner Nachfolgeregelung für notwendig. Diese sollte folgende Elemente umfassen: Erstens darf die Nutzung von Bioenergie nicht weiter pauschal als frei von CO_2-Emissionen („Nullemission“) im Energiesektor gezählt werden. Der WBGU plädiert hier jedoch nicht für einen Ersatz der unterstellten Nullemissionen durch kumulierte Emissionen aus einer Lebenszyklusanalyse der Bioenergie, da dies mit den übrigen Zurechnungsmodalitäten innerhalb der UNFCCC nicht kompatibel wäre und zu Doppelzählungen führen würde. Vielmehr sollten im Energiesektor die tatsächlich bei der Verbrennung der Biomasse entstehenden CO_2-Emissionen gezählt und angerechnet werden. Demgegenüber sollte die Aufnahme von CO_2 aus der Atmosphäre durch Energiepflanzen im Landnutzungssektor gezählt werden. Diese Korrektur würde die Behandlung von Bioenergie an dem auch ansonsten angewendeten Prinzip ausrichten, Emissionen grundsätzlich dem Ort und Zeitpunkt ihrer Entstehung zuzuordnen. Zweitens sollten die bisherigen Regelungen, bei der nur ausgewählte CO_2-Emissionen und -Absorptionen aus Landnutzung und Landnutzungsänderungen auf die Verpflichtungen der Staaten angerechnet werden bzw. werden können, durch eine vollständige Erfassung aller Emissionen aus diesen Sektoren ersetzt werden, die idealerweise in eine umfassende Vereinbarung zum Erhalt der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme innerhalb der UNFCCC eingebettet wären. Drittens bedarf es Ergänzungen, die den Handel zwischen Staaten mit und Staaten ohne Verpflichtung zur Emissionsbegrenzung betreffen. Darüber hinaus sollten die zu Emissionsbegrenzungen verpflichteten Länder für diejenigen Emissionen aus dem Lebenszyklus der Bioenergienutzung, für die bereits eine angemessene Zurechnung zu den Inventaren besteht (z.B. Nicht-CO_2-Emissionen aus der Landwirtschaft), systematisch entsprechende Anreize zur Emissionsbegrenzung auf der Akteursebene (z.B. für Land- und Forstwirte) einführen.

Bioenergie im CDM differenziert betrachten

Wegen der begrenzten Anzahl von Bioenergieprojekten hat der Clean Development Mechanism (CDM) derzeit nur einen geringen Einfluss auf die Bioenergienutzung in Schwellen- und Entwicklungsländern. Einer Ausweitung von CDM-Projekten zum Anbau von Energiepflanzen ist mit Skepsis zu begegnen, solange nicht sichergestellt werden kann, dass es in Folge dieser Landnutzung nicht zu den bekannten Verdrängungseffekten kommt und andernorts terrestrisch gespeicherter Kohlenstoff freigesetzt wird. Der Spielraum für CDM-Projekte zur Verbesserung oder Substitution von ineffizienter traditioneller Biomassenutzung sollte genutzt werden, ohne die Integrität des CDM zu beschädigen. Generell sollte bei CDM-Projekten im Bereich Bioenergie die Einhaltung des vom WBGU geforderten Mindeststandards sichergestellt werden.

Emissionen durch Landnutzungsänderungen in Entwicklungsländern begrenzen

Da die gegenwärtige Ausweitung des Anbaus von Energiepflanzen tropische Entwaldung vorantreiben kann, ist ein effektives Regime zur Verminderung der Emissionen aus Entwaldung und Walddegradation (REDD) im Rahmen der UNFCCC von hoher Bedeutung. Ein geeignetes REDD-Regime sollte wirksame Anreize setzen, um zügig reale Emissionsminderungen durch eine Reduzierung der Entwaldung zu erreichen und dazu internationale Finanztransfers in ausreichender Höhe mobilisieren. Um zum einen Ausweicheffekte (leakage) zu vermeiden

und zum anderen die natürlichen Kohlenstoffspeicher wie tropische Primärwälder dauerhaft vor Entwaldung und Degradation zu schützen und die Emissionen aus Graslandumbruch zu begrenzen, sollte das Regime aus einer Kombination nationaler Emissionsbegrenzungsziele und projektbasierter Vorgehensweise bestehen. Dabei wäre das REDD-Regime idealerweise Bestandteil einer umfassenden Vereinbarung zum Erhalt der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme innerhalb der UNFCCC.

Umfassende Vereinbarung zum Schutz terrestrischer Kohlenstoffspeicher vorantreiben

Die CO_2-Emissionen aus dem Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) sollten systematisch und vollständig in das Post-2012-Regime einbezogen werden, damit der Anreiz, den die UNFCCC zur Bioenergienutzung gibt, sich an ihrem tatsächlichen Klimaschutzbeitrag orientiert. Die CO_2-Aufnahme und -Abgabe der Biosphäre unterscheiden sich jedoch in vielen grundlegenden Aspekten – etwa Messbarkeit, Reversibilität, langfristige Kontrollierbarkeit, zwischenjährliche Schwankungen – von den Emissionen aus fossilen Energieträgern. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Charakteristika der Sektoren, auch bezüglich der Zeitdynamik und Planbarkeit, erscheinen im Hinblick auf die Einhaltung der 2°C-Leitplanke separate Minderungsziele zielführender als ein übergreifendes Minderungsziel. Der WBGU rät daher dazu, eine umfassende separate Vereinbarung zum Erhalt der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme zu verhandeln. Diese sollte erstens die Debatte zu REDD einbeziehen, zweitens die bestehenden Regelungen zur Anrechnung von Senken (auch durch CDM) auf die Minderungspflichten in den in Annex-A des Kioto-Protokolls aufgeführten Sektoren ersetzen und drittens alle CO_2-Emissionen aus LULUCF vollständig umfassen. Trotz getrennter Zielvereinbarungen hält es der WBGU aus der Perspektive ökonomischer Effizienz für angebracht, eine gewisse Austauschbarkeit anzustreben, die jedoch aufgrund der Messschwierigkeiten und anderer Unsicherheiten von LULUCF-Emissionen deutlich begrenzt und mit Abschlägen verbunden sein sollte.

5.2 Standards und Zertifizierung für Bioenergie und nachhaltige Landnutzung einführen

Um eine nachhaltige Produktion von Bioenergieträgern im Rahmen der Leitplanken des WBGU für eine nachhaltige Landnutzung sicherzustellen, ist es erforderlich, Nachhaltigkeitsstandards für Bioenergie einzuführen. Ein Mindeststandard für Bioenergieträger sollte Voraussetzung dafür sein, dass Bioenergieprodukte auf den Markt gebracht werden dürfen.

Mindeststandard für Bioenergie und nachhaltige Landnutzung gestaffelt einführen

Der WBGU empfiehlt, einen gesetzlichen Mindeststandard für alle Arten von Bioenergie zunächst auf EU-Ebene zügig einzuführen. Dazu sollten die Nachhaltigkeitskriterien für flüssige Biokraftstoffe der geplanten EU-Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien zu einem Mindeststandard für alle Arten von Bioenergie ausgebaut werden. Neben den Vorgaben zum Boden-, Wasser- und Biodiversitätsschutz sind zudem auch die Auswirkungen indirekter Landnutzungsänderungen sowie Kriterien zur Einschränkung der Nutzung gentechnisch veränderter Organismen einzubeziehen. Außerdem sollten einzelne Kernarbeitsnormen der Internationalen Arbeitsorganisation (ILO) verpflichtend verankert werden. Bezüglich der Treibhausgasemissionen empfiehlt der Beirat anstatt einer Vorgabe für die relative Treibhausgasreduktion bezogen auf die End- bzw. Nutzenergie eine Vorgabe für die absolute Treibhausgasreduktion bezogen auf die Menge an eingesetzter Rohbiomasse. So sollten durch den Einsatz von Bioenergieträgern die Lebenszyklustreibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilen Energieträgern um mindestens 30 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse gesenkt werden.

Der Anbau von Energiepflanzen sowie die Bereitstellung von Biomasserohstoffen sollten nur gefördert werden, wenn sich daraus nachweisliche Verbesserungen in Form reduzierter Energiearmut oder nachweisliche Vorteile für den Klima-, Biodiversitäts-, Boden- sowie Wasserschutz ergeben und der Anbau auch bezüglich sozialer Kriterien positiv bewertet wird.

Eine Voraussetzung sollte sein, dass durch den Einsatz der Bioenergieträger eine Reduktion der Lebenszyklustreibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilen Energieträgern um mindestens 60 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse erzielt werden kann. Als besonders förderungswürdig erachtet wird die Nutzung von biogenen Abfall- und Reststoffen und der Anbau von Energiepflanzen vor allem auf marginalem Land, wenn dabei die Förderkriterien erfüllt werden.

Mit dem Ziel einer weltweit nachhaltigen Landnutzung ist mittelfristig ein globaler Landnutzungsstandard anzustreben, der die Produktion aller Biomassearten für verschiedenste Nutzungen (Nahrungs- und Futtermittel, energetische und stoffliche Nutzung usw.) länder- und sektorübergreifend regelt.

Die EU-Mitgliedsstaaten sollten deshalb eine entsprechende Regelung zur Ausweitung der Bioenergiestandards auf alle Arten von Biomasse vorbereiten.

Bis ein global abgestimmter Landnutzungsstandard geschaffen ist, ist auch die Verankerung von Bioenergiestandards in bilateralen Abkommen ein effektives Instrument zur Erhöhung der Nachhaltigkeit. Der WBGU empfiehlt den europäischen Staaten, in künftigen Abkommen mit wichtigen Bioenergieproduktions- und -konsumentenländern verbindliche Nachhaltigkeitskriterien zu verankern. Bestehende bilaterale Verträge sollten in diese Richtung nachgebessert werden. Im Gegenzug sollten für die Handelspartner bei Einhaltung des Mindeststandards freier Marktzugang für Bioenergieträger gewährt werden.

Aus Sicht des Rechts der Welthandelsorganisation (WTO) und um Ausweichmärkte für nicht dem Mindeststandard entsprechende Bioenergieprodukte gering zu halten, sollte sich die Bundesregierung zudem bemühen, dass möglichst schnell ein internationaler Konsens zu einem Mindeststandard für nachhaltige Bioenergie sowie zu einer umfassenden internationalen Bioenergiestrategie entwickelt wird. In der Übergangszeit muss darauf hingewirkt werden, Förderungen nicht nachhaltiger Bioenergienutzungen rasch abzubauen.

Zertifizierungssysteme für nachhaltige Bioenergieträger schaffen

Um die Einhaltung des Mindeststandards nachweisen zu können, müssen zeitnah entsprechende Zertifizierungssysteme geschaffen werden. Der WBGU empfiehlt, ein international anwendbares Zertifizierungssystem für alle Arten von Biomasse zu entwickeln. Dies erleichtert die spätere Ausweitung der Bioenergiestandards auf andere Biomassenutzungen. Das System „International Sustainability and Carbon Certification“, das im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz konzipiert wurde, oder ein vergleichbares Zertifizierungssystem, sollte zügig umgesetzt werden.

Die Pflicht zum Nachweis über die Einhaltung der Standards könnte zunächst bei den Vertreibern der Endprodukte liegen. Eine originäre Zertifizierungspflicht für Bioenergierohstoffe, die auch nicht energetisch genutzt werden können, entfiele damit. Während die Zertifizierung von privaten Unternehmen durchgeführt werden sollte, müssen zur Kontrolle der tatsächlichen Umsetzung der Standards von staatlicher Seite sanktionsfähige Institutionen geschaffen werden. Entwicklungsländer und vor allem die am wenigsten entwickelten Länder (LDCs) sollten bei der Einrichtung von Zertifizierungssystemen und Kontrollstellen sowie bei der Durchführung der Zertifizierung durch technische und finanzielle Hilfe unterstützt werden.

WTO-Konformität von Umwelt- und Sozialstandards herstellen

Die WTO-Konformität eines unilateralen europäischen Standards kann rechtlich begründet werden, insbesondere bezüglich Kriterien zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und zum Schutz der globalen Biodiversität, weil die Schutzwürdigkeit von Klima und Biodiversität in multilateralen Umweltabkommen völkerrechtlich festgeschrieben ist. Generell sollte die Akzeptanz von Umwelt- und Sozialstandards im WTO-Vertragsregime weiter verbessert werden. Des Weiteren darf die angestrebte Handelsliberalisierung in Bezug auf die so genannten Environmental Goods and Services (EGS) nicht dazu führen, dass das Ziel einer nachhaltigen Produktion und Nutzung der entsprechenden Güter und Dienstleistungen unterlaufen wird. Die Bundesregierung sollte daher im Rahmen der Verhandlungen darauf hinwirken, dass nur Güter als EGS klassifiziert werden, die in jedem Fall dem vom WBGU geforderten Mindeststandard genügen bzw. aus nachhaltigen Bioenergienutzungspfaden resultieren.

5.3 Nutzungskonkurrenzen nachhaltig regulieren

Vorrang für Ernährungssicherheit gewährleisten

Ohne Gegensteuern werden sich künftig die Spielräume für die Nahrungsproduktion u.a. durch den beginnenden Bioenergieboom deutlich verschärfen. Um eine krisenhafte Entwicklung zu vermeiden, besteht Handlungsbedarf in folgenden Bereichen:

- *Integrierte Bioenergie- und Ernährungssicherungsstrategie entwickeln:* Der WBGU empfiehlt, über die von der Ressortarbeitsgruppe „Welternährungslage“ in ihrem Bericht an das Bundeskabinett genannten Maßnahmen hinaus, den Anbau von Energiepflanzen jeweils in eine integrierte Bioenergie- und Ernährungssicherungsstrategie einzubinden, bei der die Ernährungssicherheit Vorrang hat. Besonders wichtig ist dies für die Gruppe der einkommensschwachen Entwicklungsländer, die Nettoimporteure von Nahrungsmitteln sind (Low-Income Food-Deficit Countries, LIFDCs). Ein kontrollierter Ausbau der Bioenergie kann sinnvoll nur mit weltweiten Anstrengungen zur Stärkung der Landwirtschaft einhergehen. Dazu muss zunächst kurzfristig die Ernährungssituation in betroffenen Regionen verbessert werden, etwa durch Verteilung unentgeltlichen Saat-

guts für die nächste Saison. Gleichzeitig müssen die Rahmenbedingungen für Ernährungssicherheit und Nahrungsmittelproduktion langfristig verbessert und konsistent in andere Politikfelder, wie u.a. Klima- und Naturschutz, eingefügt werden. Der Anbau sollte vor allem auf marginalen, insbesondere degradierten Flächen gefördert werden.

- *Steigenden Druck auf die Landnutzung durch sich ändernde Ernährungsweisen stärker beachten:* Der stark steigende Druck auf die Landnutzung als Folge flächenintensiver Ernährungsmuster in Industrieländern und deren Ausweitung in dynamisch wachsenden großen Schwellenländern verschärft die globalen Flächennutzungskonkurrenzen. Dies ist eine große, heute noch weitgehend unterschätzte Herausforderung: bis 2030 sollen ca. 30 % der für die Ernährung erforderlichen Produktionssteigerungen für Nahrungsmittel hierauf zurückgehen. Dieser Zusammenhang zwischen individuellen Essgewohnheiten, globaler Landnutzung und Ernährungssicherheit ist zu wenig bekannt und sollte daher über Aufklärungskampagnen den Verbrauchern bewusst gemacht werden. Vorrangig sollte ein Problembewusstsein vor allem in den Industrieländern erzeugt und zu Verhaltensänderungen angeregt werden. Hierzu können auch Initiativen auf internationaler Ebene, z.B. im Umfeld der UN-Organisationen, angestoßen werden. Diese Initiativen sollten durch eine internationale Zusammenarbeit zur Flächeninanspruchnahme für den Pro-Kopf-Verbrauch von Nahrungsmitteln unterstützt werden. Nachhaltigkeitskonzepte wie der ökologische Fußabdruck können veranschaulichen, dass global derzeit natürliche Ressourcen über ihre Regenerationsfähigkeiten hinaus beansprucht werden.
- *Risiken der Landnutzung für die Ernährungssicherheit rechtzeitig erkennen:* Um künftig besser auf Krisenfälle vorbereitet zu sein, wird ein effektives Frühwarnsystem benötigt. Die vorhandenen Monitoring-Kapazitäten, z.B. bei der FAO und dem Welternährungsprogramm, sollten gestärkt und effizienter vernetzt werden. Mit dem zunehmenden Druck auf die globale Landnutzung sieht der WBGU darüber hinaus einen wachsenden Bedarf, Risiken für die Ernährungssicherheit durch Nutzungskonkurrenzen rechtzeitig zu erkennen. Dazu sind globale Monitoring- und Frühwarnsysteme sehr wichtig.
- *Kopplung von Landnutzung, Nahrungsmittel- und Energiemärkten berücksichtigen:* Die Herausforderungen zur Sicherung der Welternährung müssen heute vor dem Hintergrund des zunehmenden Drucks auf die globale Landnutzung bewältigt werden und können nicht mehr allein Gegenstand nationaler Bemühungen sein. In einer globalisierten Welt muss die Politik die immer engere Verknüpfung von Landnutzung und Preisentwicklung für Agrargüter auf der einen und dem Energiemarkt auf der anderen Seite berücksichtigen. Sie muss daher regulierende Mechanismen entwerfen, wenn etwa Entwicklungen auf den Energiemärkten zu Fehlentwicklungen für die Ernährungssicherheit führen. Langfristig ist für die Sicherung der Ernährung wichtig, dass von den Weltagrarmärkten Impulse für Produktionssteigerungen gerade in ärmeren Entwicklungsländern ausgehen. Hierzu sollten Importbarrieren für Agrargüter stärker abgebaut werden sowie Exportsubventionen und andere Produktionsfördermaßnahmen weltweit, vor allem aber in den Industrieländern, zurückgeführt werden. Bei einer Handelsliberalisierung muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich Entwicklungsländer in ihren Voraussetzungen und Bedürfnissen unterscheiden. So sind z.B. LIFDCs von Preissteigerungen auf dem Weltmarkt unmittelbar negativ betroffen. Aus diesem Grund sollten Ausnahmen von einer allgemeinen Liberalisierung für einen Kreis von vor allem ärmeren Entwicklungsländern vorgesehen werden.

Erhaltung biologischer Vielfalt: Möglichkeiten der Biodiversitätskonvention nutzen

Der Ausbau der Bioenergie darf nicht zu direkt oder indirekt ausgelöster Konversion natürlicher Ökosysteme führen. Dazu ist ein effektives Schutzgebietssystem eine zentrale Voraussetzung. Der WBGU empfiehlt, bis 2010 auf 10–20 % der Landfläche ein globales, ökologisch repräsentatives und effektiv betriebenes Schutzgebietssystem mit ausreichender Finanzierung einzurichten. Die CBD ist das wichtigste internationale Abkommen, um diese Leitplanke für den Biosphärenschutz umzusetzen.

- *Finanzierungslücke bei Schutzgebieten füllen:* Der WBGU empfiehlt dazu eine Mobilisierung von 20–30 € pro Kopf und Jahr in den Hocheinkommensländern. Dazu sollte zunächst die auf Anregung Deutschlands entwickelte und mit erheblichen finanziellen Mitteln ausgestattete LifeWeb-Initiative genutzt werden, um konkrete bilaterale Projekte zügig voran zu bringen. Parallel sollten auch andere Geberländer davon überzeugt werden, LifeWeb finanziell zu unterstützen. Gelingt dies, kann die Initiative mittelfristig zum Nukleus für ein Schutzgebietsprotokoll der CBD werden, das Umsetzung von Maßnahmen zu Schutzgebieten mit Finanzierungsinstrumenten verbindet. Inhalte und politische Realisierbarkeit des Protokolls sowie die möglichen Verknüpfungen zu

dem entstehenden REDD-Regime der UNFCCC sollten erforscht und als Option geprüft werden. Des Weiteren setzt der WBGU auf einen Ausbau internationaler Kompensationszahlungen für entgangene Einkommen durch Land- und Forstwirtschaft, um für Entwicklungsländer die Umstellung auf eine nachhaltige Landnutzung finanzierbar zu machen. In Pilotprojekten sollte geprüft werden, inwieweit nationale Habitat-Banking-Systeme in Industrieländern für Anbieter von Ökosystemleistungen aus Entwicklungsländern geöffnet werden können. Auch Transformations- und Schwellenländer sowie reiche Rohstoffländer sollten zunehmend stärker in die Finanzierung des internationalen Naturschutzes eingebunden werden. Schon jetzt sollten die Weichen für einen marktähnlichen Mechanismus gestellt werden, in dem die Zusicherung des Schutzes zuvor zertifizierter Flächen gegen Entgelt gehandelt wird.

- *CBD zur Entwicklung von Biodiversitätsleitlinien für Nachhaltigkeitsstandards nutzen:* Angesichts der Ergebnisse der COP-9 ist zwar nicht mit schnellen Fortschritten zu rechnen, aber dennoch sollte dieser Prozess durch die deutsche CBD-Präsidentschaft gefördert und so weit wie möglich beschleunigt werden. Um die notwendigen Monitoring-Kapazitäten aufzubauen, sollte parallel dazu der Ausbau der Weltdatenbank zu Schutzgebieten gefördert werden. Der Impetus für Nachhaltigkeitsstandards im Bioenergiebereich sollte mittelfristig genutzt werden, um zu allgemeinen Leitlinien für alle Formen der Biomasseproduktion zu kommen.

Wasser- und Bodenschutz durch den Anbau von Energiepflanzen langfristig verbessern

Die aktuellen Trends zur globalen Wasser- und Bodennutzung zeigen in die falsche Richtung. Ohne Politikwandel wird der Weg in vielen Regionen in eine verschärfte Wasserkrise und zu erhöhter Bodendegradation führen.

- *Analyse der regionalen Wasser- und Bodenverfügbarkeit zur Voraussetzung machen:* Da Wasser und Boden in vielen Regionen prekäre Ressourcen sind, sollte vor der großflächigen Förderung von Bioenergieanbausystemen eine integrierte Analyse der regionalen Wasser- und Bodenverfügbarkeit vorgenommen werden. Nicht anpasste Bioenergieanbausysteme und der global wachsende Energiehunger können den Nutzungsdruck auf Boden- und Wasserressourcen stark erhöhen. Daher sollte der Anbau von Energiepflanzen jeweils in eine regionale Strategie zum nachhaltigen Boden- und Wassermanagement integriert werden.
- *Energiepflanzenanbau zur Restaurierung marginaler Flächen nutzen:* Bei Wahl des richtigen Anbausystems kann die Kultivierung von Energiepflanzen auf marginalen Böden (z.B. auf degradiertem Land) sogar zu einer Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit führen. Der Anbau von Energiepflanzen auf degradierten Flächen ist auch deshalb eine strategische Option, da hierdurch Flächen restauriert werden können, die später zumindest teilweise für die Nahrungsproduktion zur Verfügung stehen könnten. Der zunehmende Druck auf die Landnutzung könnte dadurch partiell gedämpft werden.

5.4 Förderpolitiken für Bioenergie gezielt einsetzen

Es sollten grundsätzlich nur Bioenergiepfade gefördert werden, die auf besonders nachhaltige Weise zum Klimaschutz beitragen. Darunter versteht der WBGU, dass nicht nur der Mindeststandard eingehalten wird, sondern dass unter Berücksichtigung der gesamten Lebenszyklusemissionen durch den Einsatz der Bioenergie mindestens 60 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse eingespart werden können. Da aber aus praktischen Gründen die Förderung an verschiedenen Stufen im Produktionsprozess (Anbau-, Konversions- und Anwendungssysteme) erfolgen sollte, muss hier in der Regel mit Standardannahmen über die jeweils anderen Stufen gearbeitet werden.

Speziell im Hinblick auf eine Förderung des Anbaus von Energiepflanzen erachtet es der WBGU als erforderlich, dass zusätzlich ökologische und soziale Förderkriterien erfüllt sein müssen. Bei der Mobilisierung biogener Reststoffe sollten ebenfalls ökologische Grenzen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit berücksichtigt werden. Schließlich sollte die Förderung von Konversions- und Anwendungssysteme so gestaltet werden, dass sie sich in das Leitbild der Energiewende zur Nachhaltigkeit einfügt. Ungewünschte Pfadabhängigkeiten sollten vermieden und zukunftsträchtige Technologien, wie z.B. Elektromobilität, gefördert werden.

Nachhaltigkeit der Energiesysteme umfasst außer dem Klimaschutz auch die Beseitigung von Energiearmut. Die Modernisierung der netzunabhängigen bzw. traditionellen Nutzung von Bioenergie kann dazu besonders im ländlichen Raum von Entwicklungsländern einen wertvollen Beitrag leisten. Hier erscheint dem WBGU eine Förderung bioenergiebasierter Projekte auch dann gerechtfertigt, wenn die Klimaschutz- und Förderkriterien nicht voll erfüllt werden.

Förderung im Agrarsektor umgestalten

Nachhaltige Biomasseproduktionen für energetische Zwecke sollten idealerweise nur dann gefördert werden, wenn durch die Landnutzung Natur- oder Bodenschutzleistungen unterstützt werden. Wenigstens sollten jedoch Förderungen von Biomasseproduktionen, die dem WBGU-Mindeststandard nicht genügen, innerhalb der nächsten Jahre beseitigt und möglichst auf nachhaltige Produktionen umgeschichtet werden. Im Allgemeinen sollten Produktionssubventionen im Agrarsektor weitestgehend abgebaut werden, damit ein ineffizienter Subventionswettlauf der Anbieterländer beendet und Marktverzerrungen im Weltagrarhandel abgebaut werden. Eine Ausnahme bilden Subventionen, die entwicklungs- und umweltpolitisch einen hohen Nutzen stiften: Sie sollten explizit zulässig sein.

Aus Förderung flüssiger Biokraftstoffe aussteigen und Elektromobilität fördern

Die Technologiepolitik zur Bioenergienutzung im Verkehr muss neu ausgerichtet werden. Die Förderung flüssiger Biokraftstoffe für Mobilität im Straßenverkehr lässt sich besonders in Industrieländern unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten nicht rechtfertigen. Gegen eine Förderung sprechen u.a. hohe Vermeidungskosten von Treibhausgasemissionen, geringe bzw. negative Vermeidungsleistungen pro Fläche bzw. pro Menge an eingesetzter Biomasse und Lock-in-Effekte einer ineffizienten Verkehrsinfrastruktur auf Basis von Verbrennungsmotoren. Beimischungsquoten sollten nicht weiter erhöht und die derzeitige Beimischung von Biokraftstoffen innerhalb der nächsten drei bis vier Jahre ganz zurückgenommen werden. Die auf EU-Ebene vereinbarten Emissionsminderungen im Straßenverkehr müssen dann auf anderen Wegen erreicht werden. Höchste energetische Nutzungsgrade der Biomasse im Verkehrssektor werden durch Stromerzeugung und -nutzung in elektrischen Fahrzeugen erreicht. Für einen Ausbau der Elektromobilität sollten geeignete Rahmensetzungen erfolgen. Förderpolitiken können Unternehmen in ihrer Technologieentwicklung beim Aufbau der Anschlussmöglichkeiten an das Stromnetz unterstützen. Die Nachfrage nach Elektro- bzw. Hybridfahrzeugen kann durch abgabenpolitische Maßnahmen angeregt werden.

Bioenergienutzungspfade für Strom- und Wärmeerzeugung voranbringen

Verstärkte Anreize zur Ausschöpfung des Potenzials organischer Reststoffe und Abfälle werden vor allem durch die Förderung erneuerbarer Energien in der Strom- und Wärmeerzeugung gesetzt. Hier gilt es, den Einsatz biogener Abfälle und Reststoffe so zu fördern, dass er gegenüber der Stromerzeugung aus Energiepflanzen klar bevorzugt wird. Flankierend sind geeignete Regulierungen zur Reststoffentnahme aus Land- und Forstwirtschaft sowie zur Abfalldeponierung und zu Kaskadennutzungen erforderlich. Die in verschiedenen Ländern bestehende Förderung der Direktverbrennung von Biomasse (vor allem Hackschnitzel und Pellets aus Reststoffen) in Kohle- bzw. Heizkraftwerken und des Einsatzes von Biogas, Rohgas und Biomethan sollte fortgeführt bzw. vorzugsweise in allen Regionen eingeführt werden, die einen hohen Kohleanteil in der Stromerzeugung aufweisen. Hierbei ist jedoch unbedingt sicherzustellen, dass die Biomasse dem Mindeststandard für Nachhaltigkeit genügt. Die Verstromung von Biomasse, die den Förderkriterien genügt, sollte außerdem besonders gefördert werden. Außerdem ist der Einsatz von Biomethan insbesondere dann zusätzlich zu fördern, wenn das beim Herstellungsprozess ohnehin abzutrennende CO_2 einer sicheren Deponie zugeführt wird. Wenn parallel die internationale Verbreitung von Kraft-Wärme-Kopplung sowie Gas-und-Dampfkraftwerken durch geeignete klima- und energiepolitische Rahmenbedingungen sowie geeignete Förderansätze deutlich zunimmt, lassen sich Bioenergienutzungspfade mit hohen Effizienzgraden und somit global spürbaren Emissionseinsparungen erzielen. Während die Verfeuerung von Hackschnitzeln oder Pellets zur Stromerzeugung aus Sicht des WBGU eindeutig förderungswürdig ist, sollten staatliche Zulagen für die reine Wärmenutzung in Industrieländern allenfalls für eine Übergangszeit gewährt werden, bis diese Nutzung im transformierten Energiesystem aus der KWK bzw. über mit regenerativem Strom betriebenen Wärmepumpen erfolgt.

Internationales Abkommen über (Bio)Energiesubventionen initiieren

Um umweltschädliche Energiesubventionen abzubauen und Nachhaltigkeitskriterien ein stärkeres Gewicht zu geben, sollten die Staaten ihre Politiken international koordinieren. Sie sollten Vereinbarungen eingehen, wonach nicht nachhaltige Energiesubventionen länderübergreifend zurückgeführt und Prinzipien für zulässige Subventionen festgelegt werden, die sich am Postulat der Nachhaltigkeit orientieren. Dies könnte z.B. im Rahmen eines Multilateralen Energiesubventionsabkommens (MESA) geschehen, in dem zunächst möglicherweise nur die wichtigsten Energieerzeuger und -verbraucher eingebunden wären und das langfristig im WTO-Regelwerk verortet werden könnte.

Stoffliche Nutzung von Biomasse strategisch gestalten

Um Strategien zur stofflichen Nutzung von Biomasse aus Land- und Forstwirtschaft vorzube-

reiten, sind national und global Stoffstromanalysen und Bilanzen der Flächeninanspruchnahme zu erstellen. In Szenarien sollten absehbare Entwicklungen (Nutzungskonkurrenzen, Substitutionsprozesse u.a.) sowie Handlungsoptionen beschrieben werden. Für zentrale Stoff- und Produktkategorien (Zellstoff, Papierprodukte u.a.) sollten Nachhaltigkeitsstandards für den Anbau und die Gewinnung der Rohstoffe festgelegt und Produktstandards mit hohen Recylingquoten gesetzt werden. Durch geeignete Maßnahmen sollten hohe Ressourcen- und Produktverbräuche massiv gesenkt werden.

5.5 Nachhaltiges Bioenergiepotenzial in Entwicklungs- und Schwellenländern nutzen

Bekämpfung der Energiearmut entwicklungspolitische Priorität einräumen

Der WBGU empfiehlt als Zielsetzung, die Überwindung gesundheitsschädlicher Formen der traditionellen Bioenergienutzung bis 2030 anzustreben. Der Zugang zu modernen Energieformen sollte zwar nicht als eigenständiges Ziel, jedoch als Mittel zur Armutsbekämpfung explizit in die Millenniumsentwicklungsziele (MDGs) aufgenommen und in den energiepolitischen Portfolios der Akteure der Entwicklungszusammenarbeit stärker verankert werden. Als erster Schritt empfiehlt sich, die Bekämpfung der Energiearmut systematisch in Poverty Reduction Strategy Papers (PRSPs) zu integrieren. Die internationale Gemeinschaft sollte Bioenergieprojekte besonders fördern, die der netzunabhängigen ländlichen Energieversorgung in Entwicklungsländern dienen.

Strategien zur Energiearmutsbekämpfung auf verlässliche Datenbasis gründen

Um mögliche Alternativen zur Bereitstellung von Energiedienstleistungen prüfen zu können und die Hemmnisse bei der Umsetzung besser zu verstehen, müssen die Akteure der internationalen Entwicklungszusammenarbeit gemeinsam mit nationalen Akteuren Strategien zur Bekämpfung der Energiearmut auf der Grundlage solider empirischer Ergebnisse entwickeln und diese in geeignete politische Strategien einbetten. Der WBGU empfiehlt deshalb, länderübergreifende Querschnittsevaluierungen und national, regional und lokal spezifische Untersuchungen durchzuführen, um Hinweise auf Best-practice-Ansätze zu erhalten.

Entwicklungsländer bei der Konzeption nationaler Bioenergiestrategien unterstützen

Um die Chancen und Entwicklungspotenziale der Bioenergie realistisch einschätzen und Risiken minimieren zu können, empfiehlt der WBGU, strategische Fragen im Länderkontext und unter möglichst breiter Beteiligung betroffener Interessens- und Bevölkerungsgruppen zu diskutieren und über vorrangige Ziele einer Förderung von Bioenergie zu entscheiden. Die Akteure der Entwicklungszusammenarbeit sollten die Partnerländer dabei unterstützen, diese Strategien zu entwickeln und alle Nutzungs- und Anwendungsformen der Bioenergie sowie ihre Alternativen zu prüfen und hinsichtlich ihrer Eignung für die lokale Situation abzuwägen. Sie sollten außerdem darauf hinwirken, dass Mindeststandards und Förderkriterien eingehalten werden und die notwendigen Governance-Kapazitäten wie Landnutzungsplanung oder Zertifizierung gestärkt werden. Außerdem müssen Bioenergiestrategien unbedingt mit Strategien zur Ernährungssicherung verknüpft werden.

Pilotprojekte mit besonders nachhaltigen Anbausystemen sowie Rest- und Abfallnutzung fördern

Anbaumethoden, die besonders nachhaltig sind und Beiträge zur Erosionsbekämpfung und Biodiversitätserhaltung sowie zur Verringerung der Energiearmut und ländlichen Entwicklung leisten, sollten in Pilotprojekten gefördert werden. Dazu zählen beispielsweise der sozialverträgliche Anbau geeigneter mehrjähriger Energiepflanzen auf degradierten Flächen oder Waldfeldbau. Der WBGU empfiehlt außerdem, die länderspezifischen Potenziale an Rest- und Abfallstoffen zu prüfen und bei der Stromerzeugung vor allem in agroindustriellen Biogasanlagen und Heizkraftwerken unter Nutzung der Abwärme einzusetzen. Durch Pilotvorhaben kann die Mobilisierung von Rest- und Abfallstoffen verbessert werden.

Bioenergiepartnerschaften knüpfen

Eine multilaterale Zusammenarbeit zur nachhaltigen Bioenergienutzung kann durch zwischenstaatliche Partnerschaften ergänzt werden. Hierbei bieten sich Technologieabkommen an, z.B. zur Verbreitung von Technologien zur Biomethanaufbereitung und -verwendung. Diese können mit Aspekten einer nachhaltigen Landnutzungspolitik oder Handelspartnerschaften verknüpft werden.

Umbau des Weltenergiesystems vorantreiben

Um die Kaufkraft der von Energiearmut Betroffenen zu erhöhen, sollte die Entwicklungszusammen-

arbeit Mikrofinanzierungssysteme weiterhin finanziell unterstützen. Zur Mobilisierung von privatem Kapital sollten Kooperationen zwischen dem privaten und öffentlichen Sektor gefördert werden. Zur großskaligen Substitution fossiler Brennstoffe können auch CDM-Projekte verstärkt genutzt werden. Die vom WBGU empfohlenen Technologien zum nachhaltigen Einsatz von Bioenergie in den Energiesystemen der Entwicklungsländer dienen nicht nur der Bekämpfung der Energiearmut, sondern größtenteils auch dem Klimaschutz. Beispielsweise ist eine Zulassung von kleinskaligen CDM-Projekten zur Effizienzverbesserung bei der traditionellen Bioenergienutzung begründbar und kann zur Finanzierung beitragen. Zudem sollte die internationale Gemeinschaft den Umbau des Weltenergiesystems koordinieren und unterstützen. Der WBGU empfiehlt, dass sich die Bundesregierung auf europäischer Ebene und in den Aufsichtsgremien der betreffenden internationalen Organisationen an die Spitze eines solchen Prozesses stellt, um ihrer Vorreiterrolle beim Klimaschutz gerecht zu werden.

5.6 Strukturen für eine nachhaltige globale Bioenergiepolitik schaffen

Globales Landnutzungskataster aufbauen

Eine wichtige Voraussetzung für das Monitoring von direkten und indirekten Landnutzungsänderungen bei der Einführung von Standards und der erforderlichen Zertifizierungssysteme ist die Erarbeitung eines globalen, GIS-gestützten Landnutzungskatasters. Als wichtiger Baustein hierfür ist der rasche Ausbau der Weltdatenbank über Schutzgebiete des UNEP-WCMC zu empfehlen. Das globale Landnutzungskataster muss aber darüber hinausgehen und in der Lage sein, für jeden importierten Bioenergieträger Auskunft über die entsprechende Produktionsfläche zu geben (geographische Koordinaten, Art des Anbaus, Selbstverpflichtung zur Einhaltung aller Kriterien usw.).

Schaffung eines institutionellen Rahmens zur Globalisierung von Standards

Zur Entwicklung eines weltweit einheitlichen Bioenergiestandards und um multilaterale Politikformulierung zu beschleunigen, sollte die Global Bioenergy Partnership (GBEP) als Forum genutzt werden. Sie bringt zentrale Akteure zusammen und bindet Schwellenländer ein. Allerdings wäre dabei darauf hinzuwirken, dass betroffene zivilgesellschaftliche Akteure verstärkt am Dialog beteiligt werden. GBEP bzw. die Task Force on Sustainability sollte darin unterstützt werden, als zwischenstaatliches Forum die formellen und informellen Prozesse zur Erarbeitung globaler Nachhaltigkeitskriterien zu bündeln und auf die Erarbeitung globaler Standards und Richtlinien hinzuwirken. Die Vorschläge des WBGU, der wichtige Anregungen des Roundtable on Sustainable Biofuels aufgegriffen hat, können eine Grundlage dafür bilden.

Bioenergie durch die IRENA fördern

Die Gründung einer Internationalen Agentur für Erneuerbare Energien (IRENA) mit dem Ziel, den weltweiten Einsatz erneuerbarer Energien durch Politikberatung, Technologietransfer und Verbreitung von Wissen zu fördern, ist ein richtiger Schritt zur Bündlung und institutionellen Stärkung der internationalen Energiepolitik. Allerdings sollten neben einer Förderung erneuerbarer Energien alle Aspekte der Energiewende zur Nachhaltigkeit in das Aufgabenspektrum einbezogen werden. Die IRENA sollte in die Lage versetzt werden, auch Aspekte der Energienachfrage sowie Energie-, Umwelt- und Entwicklungsfragen umfassend und integriert zu bearbeiten.

International Conference on Sustainable Bioenergy einberufen

Um global ein gemeinsames Verständnis über die Chancen und Risiken der Bioenergie sowie einen Konsens über angemessene Normen bezüglich der Produktion und der Nutzung unterschiedlicher Formen der Bioenergie zu erzielen, empfiehlt der WBGU eine International Conference on Sustainable Bioenergy zeitnah einzuberufen, die nach dem Vorbild der renewables 2004 ausgestaltet sein könnte. Auf der Konferenz könnten Ziele und allgemeine Förderprinzipien formuliert, Ideen für Best-practice-Ansätze ausgetauscht und Vereinbarungen über internationale Bioenergiepartnerschaften sowie die Bedeutung der Bioenergie für ein nachhaltiges globales Energiesystem getroffen werden. Wichtig ist, dass dazu Akteure aus den Bereichen der Agrar-, Energie- Umwelt- und Entwicklungspolitik zusammenkommen.

5.7 Globales Landnutzungsmanagement als Herausforderung der Zukunft

Das Problem konkurrierender Landnutzung birgt nach Ansicht des WBGU ein über das Handlungsfeld der Bioenergie weit hinaus reichendes, zukünftiges Konfliktpotenzial. Bereits heute zeichnen sich krisenhafte Entwicklungen bei der Sicherung der Welternährung ab, die sich mit einer auf etwa 9 Mrd. anwachsenden Weltbevölkerung und zunehmend

flächenintensiven Ernährungsmustern weiter verschärfen werden. Globales Landnutzungsmanagement wird daher zu einer zentralen Zukunftsaufgabe, wenn Konflikte um Land vermieden werden sollen.

Globale Kommission für nachhaltige Landnutzung einsetzen

Der steigende Druck auf die Landnutzung ist eine globale Herausforderung, die in ihren Ausmaßen und ihrer Komplexität bisher nur wenig verstanden ist. Damit ist ein komplexes, neues Feld der internationalen Politik angesprochen, in dem ernährungs-, energie-, entwicklungs- sowie umwelt- und klimapolitische Fragen zusammenspielen. Landnutzung lässt sich angesichts der vielfältigen globalen Wechselwirkungen und Verflechtungen künftig nicht mehr ausschließlich als ein Feld nationalstaatlichen Handelns begreifen. Das Beispiel der weltweiten Wirkungen indirekter Landnutzungsänderungen im Zusammenhang mit dem Ausbau der Bioenergie sowie die Frage eines fairen Pro-Kopf-Flächenverbrauchs zur Sicherung der Welternährung belegen dies eindrücklich. Um diese Prozesse auf internationaler Ebene zu beginnen und den Suchprozess zu organisieren, sollte eine neue globale Kommission für nachhaltige Landnutzung eingerichtet werden. Die Aufgabe der Kommission soll darin bestehen, die wichtigen Herausforderungen im Themenkomplex der globalen Landnutzung zu identifizieren und den Stand des Wissens zusammenzutragen. Darauf aufbauend sollte die Kommission Grundlagen, Mechanismen und Leitlinien zum globalen Landnutzungsmanagement erarbeiten. Die Kommission könnte beim UN-Umweltprogramm (UNEP) angesiedelt werden und in enger Zusammenarbeit mit anderen UN-Organisationen, z.B. der FAO, stehen. Die Ergebnisse sollten dann regelmäßig im Rahmen des globalen Umweltministerforums von UNEP oder des strategisch wichtigen Forums der Staats- und Regierungschefs (G8+5) auf die Agenda gesetzt werden.

Einleitung 1

Entscheide lieber ungefähr richtig,
als genau falsch.
Johann Wolfgang von Goethe,
1749–1832

Bioenergie in Form offener Feuer war die erste menschlich genutzte Energiequelle, und noch heute ist ein Viertel der Menschheit auf diese traditionelle Bioenergienutzung angewiesen. Seit 150 Jahren haben fossile Energieträger wie Kohle, später dann Erdöl und Erdgas Holz als dominierende Primärenergiequelle abgelöst. Die Entstehung von Märkten für moderne Bioenergieformen ist dagegen ein relativ junges Phänomen, dessen Dynamik in Industrie- und Entwicklungsländern durch sehr unterschiedliche Motive angetrieben wird. Vor allem flüssige Biokraftstoffe für den Verkehr spielen in der aktuellen öffentlichen Diskussion eine zentrale Rolle.

Die teilweise massiven Förderpolitiken und -programme für Bioenergie in vielen Ländern stützen sich auf die Chancen für Klima- und Umweltschutz, Energiesicherheit sowie ländliche oder wirtschaftliche Entwicklung. Im Zusammenhang mit Preissteigerungen für Nahrungsmittel ist aber in den vergangenen Jahren deutlich geworden, dass Bioenergie durchaus auch Risiken birgt und Zielkonflikte etwa zwischen der Nutzung einer Fläche für den Anbau von Pflanzen für die Nahrungsmittelproduktion oder zur energetischen Verwendung hervorrufen kann. Werden natürliche oder naturnahe Flächen für den Energiepflanzenanbau umgebrochen, werden außerdem Treibhausgase durch den Abbau des Bodenkohlenstoffs freigesetzt und biologische Vielfalt geht verloren.

Der steigende Ölpreis hat die Suche nach Ersatzstoffen für Benzin und Diesel beim Betrieb von Verbrennungsmotoren verstärkt und so auch den Bioenergieausbau beschleunigt. Vor allem hinsichtlich Produktion und Nutzung von Energiepflanzen, auf die sich zahlreiche Akteure der Bioenergiepolitik konzentrieren, sind aber viele Annahmen, die die Grundlage für die Entscheidungen der Förderpolitik bilden, wissenschaftlich noch unzureichend abgesichert. So ist z.B. noch nicht hinreichend geklärt, welche Nutzungspfade von Energiepflanzen unter welchen Anbau- und Nutzungsbedingungen einen deutlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten können, wie direkte und indirekte Landnutzungsänderungen bilanziert und wie Nutzungskonkurrenzen effektiv vermieden werden können. Andererseits bietet die Energiegewinnung aus Rest- und Abfallstoffen ein vergleichsweise unproblematisches nachhaltiges Potenzial für die energetische Nutzung von Biomasse, dessen Ausschöpfung bisher zu wenig beachtet wurde.

Die sehr unterschiedlichen agro-ökologischen und sozioökonomischen Bedingungen sowie die vielfältigen nationalen Energieversorgungsstrukturen lassen keine pauschalen Empfehlungen zur Nutzung von Bioenergie zu, es bedarf – neben der Etablierung globaler Leitplanken und Standards zur Sicherung nachhaltiger Bioenergienutzung – stets einer Abwägung vor Ort. Die hohe Geschwindigkeit des gegenwärtigen Bioenergieausbaus bei gleichzeitig vorhandenen Nachhaltigkeitsrisiken unterstreicht aber die Notwendigkeit, nationale und internationale Rahmenbedingungen für die energetische Nutzung von Biomasse zu etablieren. In diesem Umfeld unsicheren Wissens und konfligierender politischer Interessen sieht der WBGU die Hauptaufgaben des vorliegenden Gutachtens darin, Wege nachhaltiger Bioenergienutzung und der sich daraus bietenden Chancen zu identifizieren, auf bestehende Unsicherheiten hinzuweisen, Risiken zu benennen sowie kurz- und langfristige Regelungsmöglichkeiten und -notwendigkeiten aufzuzeigen.

Das WBGU-Gutachten bietet eine globale Sicht auf das Thema Bioenergie und beschreibt die unterschiedlichen Motivationen der Industrie,- Schwellen- und Entwicklungsländer für die energetischen Nutzung von Biomasse. Weil Bioenergie weit mehr ist als flüssige Biokraftstoffe, wird im Gutachten zwischen traditioneller Biomassenutzung, biogenen Abfall- und Reststoffen sowie Energiepflanzen unterschieden. Bestandteil des Gutachtens ist eine Abschätzung des global nachhaltigen Potenzials für den Energiepflanzenanbau, das durch die WBGU-Leitplanken für Ernährungssicherheit, Klimaschutz

und Naturschutz begrenzt wird. In diesem Zusammenhang werden auch bestehende Landnutzungskonkurrenzen untersucht und bewertet. Darüber hinaus beurteilt der WBGU über 60 Pfade der Bioenergienutzung vom Rohstoff bis zur Energiedienstleistung hinsichtlich ihres (positiven, neutralen oder negativen) Beitrags zur globalen Energiewende in Richtung Nachhaltigkeit.

Der WBGU sieht für Bioenergie ein nachhaltiges, globales Potenzial in der Größenordnung von rund einem Viertel des heutigen Primärenergieeinsatzes. Diese Chancen nutzen, aber gleichzeitig die Risiken minimieren, und das vor dem Hintergrund zunehmend globalisierter Märkte, unterschiedlichster politischer Interessen und eines sich beschleunigenden Klimawandels: die Politik muss die Rahmenbedingungen für eine nachhaltige energetische Biomassenutzung zügig festlegen, bevor Pfade eingeschlagen werden, die dem Klima eher schaden als nutzen. Das vorliegende Gutachten will hier eine Navigationshilfe sein.

Motivationen für die Nutzung von Bioenergie 2

Die verstärkte Produktion und Nutzung von Biomasse für energetische Zwecke und die Entstehung eines Marktes für *moderne* Bioenergie wird weltweit aus unterschiedlichen Motiven und mit unterschiedlichen Politiken aktiv vorangetrieben (GBEP, 2007). Die teilweise massiven Förderpolitiken- und Programme stützen sich auf Argumente wie Klima- und Umweltschutz, Energie- und Versorgungssicherheit sowie ländliche oder nationale Entwicklung. Der WBGU konzentriert sich in seiner Untersuchung auf die Rolle der Bioenergie in einem nachhaltigen globalen Energiesystem und hat damit einen spezifischen Blick auf die globale Bioenergiediskussion. Es bleibt trotzdem wichtig, die Dimensionen und die Dynamik der Gesamtdebatte zu verstehen, um die Potenziale und Grenzen der Bioenergie und die Rahmenbedingungen für politische Gestaltung sichtbar zu machen.

Im Folgenden werden die wichtigsten aktuellen Diskurse zum Thema Bioenergie kurz vorgestellt. Anhand der im Wesentlichen parallel verlaufenden unterschiedlichen Diskurse werden Schnittstellen und Widersprüche der gegenwärtigen Bioenergiepolitiken erkennbar. Außerdem zeigt sich, dass auf einzelstaatlicher wie auf transnationaler Ebene, in Industrie- und Entwicklungsländern, vielfältige politische und ökonomische Interessen zum Tragen kommen, deren Kenntnis eine wesentliche Voraussetzung für ein Verständnis der derzeitigen Debatte und der Einschätzung der Perspektiven einer zukünftigen nachhaltigen Politik ist. Das vorliegende Kapitel stellt somit den größeren Kontext dar, in dem der WBGU seine eigenen Zielsetzungen und Prioritäten für eine nachhaltige globale Bioenergiepolitik begründet.

2.1 Aktuelle Diskurse um Bioenergie

In der jüngeren Vergangenheit haben sich mindestens drei unterschiedliche Bioenergiediskurse entwickelt, die durch vielfältige Motivationen und Akteurskonstellationen getragen werden. Es ist nicht zuletzt auch der Dynamik dieser unterschiedlichen Diskurse geschuldet, dass sich bislang noch kein vorherrschendes Paradigma über Nutzen und Schaden der Bioenergie etablieren konnte

Als erstes ist ein klima- und umweltpolitischer Diskurs zu nennen, der auf den Beitrag der Bioenergie zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung abzielt. Bioenergie gilt als „grüne“, klimafreundliche Energieform. Insbesondere in den Industrieländern wird ihr deshalb eine wichtige Rolle für die Erfüllung der Kioto-Verpflichtungen beigemessen. Langfristig soll Bioenergie so auch zum Umbau der Energiesysteme in Richtung einer kohlenstoffarmen Wirtschaft beitragen. Diesen Diskurs stützen derzeit auch die Richtlinien des IPCC, denn dort gilt die Nutzung von Bioenergie grundsätzlich als kohlenstoffneutral (IPCC, 2006).

Exemplarisch für eine in diesen Diskurs eingebettete Politik ist die Biokraftstoffrichtlinie (2003/30/

Kasten 2-1

Begriffe: Bioenergie, Biokraftstoffe, Agro- oder Agrarkraftstoffe

In der öffentlichen Debatte kursieren viele Begriffe zum Thema Bioenergie, die nicht einheitlich verwendet werden. Bioenergie ist die End- bzw. Nutzenergie, die aus Biomasse gewandelt und bereitgestellt werden kann. Unter Biokraft- oder -treibstoffen versteht man flüssige oder gasförmige Kraftstoffe biogenen Ursprungs, die im Verkehr als Antriebsmittel oder stationär zur Stromproduktion bzw. auch in der Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden.

Weil die Vorsilbe „Bio“ eine positive Konnotation besitzt, Biokraftstoffe aber auch aus nicht nachhaltigem Energiepflanzenanbau stammen können, wird inzwischen vielfach von Agro- bzw. Agrarkraftstoffen gesprochen, allerdings seltener von Agrarethanol, Agroenergie oder etwa Agrargas. Der WBGU bleibt jedoch bei den ursprünglichen Begriffen, weil Bioenergie, Biokraftstoffe oder Biogas die im deutschen Sprachgebrauch geläufigsten Bezeichnungen darstellen.

EG) der EU, die auf eine Reduktion verkehrsbedingter CO_2-Emissionen durch eine Beimischung von Biokraftstoffen abzielt. Warum der Beitrag des Verkehrssektors zum Klimaschutz gerade über flüssige Biokraftstoffe geleistet werden soll, lässt sich u. a. aus der Interessenslage eines gewichtigen Akteurs der europäischen Wirtschaftspolitik erklären: der Automobilindustrie. Da die Verwendung von Biokraftstoffen in konventionellen Verbrennungsmotoren nur geringfügige technische Anpassungen erfordert, lässt sich durch ihre Nutzung ein weitreichender und möglicherweise kostenintensiver Technologiewandel vermeiden; gleichzeitig wird ein ernsthafter Beitrag zum Klimaschutz ins Feld geführt. Unternehmen erhoffen so, mit geringem Aufwand ihren Beitrag zum Klimaschutz demonstrieren zu können, während für Konsumenten keine Notwendigkeit zu unmittelbaren Verhaltensänderungen wie beispielsweise einer Reduktion ihrer mit dem Auto gefahrenen Kilometer besteht. Da die Frage nach der tatsächlichen Klimawirksamkeit derartiger Biokraftstoffe zunächst nicht ernsthaft gestellt wurde, schien dieser Weg für Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft attraktiv und mit verhältnismäßig geringen Widerständen verbunden. Die unterstellte Klimawirksamkeit wurde nicht nur in den Industrieländern ein zentrales Argument für die Förderungswürdigkeit von Biokraftstoffen aus Energiepflanzen. Mit zunehmenden Informationen über ambivalente Klimabilanzen und zusätzlich sichtbar werdenden Wechselwirkungen mit der Nahrungsmittelproduktion und dem Naturschutz sehen sich die Befürworter und Förderer von Biokraftstoffen inzwischen schärfer werdender Kritik ausgesetzt. Deshalb kommt es bereits zu ersten politischen Korrekturen bis hin zu Forderungen nach Moratorien für den Anbau von Energiepflanzen (Redaktion Umwelt Aktuell, 2008).

Als zweites ist ein Diskurs um Ressourcenverknappung, steigende Energiepreise und Energiesicherheit von Bedeutung, in dem Bioenergie als Alternative zu den fossilen Energieträgern Kohle, Erdöl und Erdgas betrachtet wird. Dieser Diskurs fußt auf der Annahme, dass der Einsatz von Biomasse zu mehr Energie- und Versorgungssicherheit sowie einer reduzierten Abhängigkeit vom Import fossiler und nuklearer Energieträger beitragen kann.

Die massive Verteuerung und prognostizierte Knappheit fossiler Brennstoffe, vor allem die des Erdöls („peak oil“), und die steigende Nachfrage aus Schwellenländern haben in den vergangenen Jahren eine neue Versorgungsdebatte entfacht (Worldwatch Institute, 2007; Economist, 2008a). Da die Förderung von Erdöl auf wenige, vielfach politisch instabile Regionen konzentriert ist, werden für eine Substituierung von Ölimporten außerdem sicherheitspolitische and geostrategische Motive genannt (Mildner und Zilla, 2007; Adelphi Consult und Wuppertal Institut, 2007). Diese Begründungszusammenhänge spielen vor allem in den USA eine wichtige Rolle (White House, 2006). Auch in der Europäischen Union wird die Abhängigkeit von russischem Gas und Erdöl als ernsthaftes Risiko für die Versorgungssicherheit betrachtet (EU-Kommission, 2005c). In beiden Fällen wurden ehrgeizige Pläne für den Ausbau der energetischen Biomassenutzung, speziell der flüssigen Biokraftstoffe, mit diesen Argumenten gestützt.

Die Verringerung der Importabhängigkeit ist aber auch erklärtes Ziel der Bioenergieprogramme vieler Schwellen- und Entwicklungsländer. Hauptziel einer solchen Verringerung ist dabei die Vermeidung hoher Beschaffungskosten für fossile Rohstoffe. Die hohen Ölpreise der letzten Jahre haben die Außenhandelsbilanz vieler Länder deutlich verschlechtert und Importsubstitutionen durch Bioenergie wird als möglicher Ausweg aus dieser Situation angepriesen (UN-Energy, 2007b). So waren etwa hohe Rohölpreise und das Ziel der Selbstversorgung wesentliche Determinanten der Biokraftstoffpolitik, mit der die brasilianische Regierung 2006 das Ziel der Selbstversorgung mit Rohöl erreicht hat (IEA, 2006a). Auch andere Schwellen- und Entwicklungsländer, wie z. B. Indien oder Indonesien, nennen die Importsubstitution als wesentliche Motivation für ihre Biokraftstoffstrategien (z. B. Planning Commission, 2003).

Insgesamt ist auch dieser Diskurs, der in Entwicklungs-, Schwellen- und Industrieländern gleichermaßen vorzufinden ist, häufig auf flüssige Biokraftstoffe und den Verkehrssektor verengt. Neben den Mineralölversorgern und klein- und mittelständischen Unternehmen, die in Industrieländern große Marktchancen für Biokraftstoffe sehen (Economist, 2008a), finden sich auch in Entwicklungs- und Schwellenländern gewichtige Interessen, die für einen Entwicklungspfad in Richtung Rohölsubstitution sprechen: Die wachsenden wohlhabenden Konsumentengruppen und die rasant steigende Nachfrage nach Automobilen. Innerhalb dieser spezifischen „nationalen“ Versorgungsdiskurse spielt das Argument einer verbesserten Energieversorgung in ländlichen Räumen nur eine untergeordnete Rolle. Dementsprechend sind die Prioritäten und Förderpolitiken nicht in ausreichendem Maße an den Bedürfnissen der von Energiearmut betroffenen Länder und Regionen ausgerichtet.

Als drittes ist ein Diskurs um ländliche Entwicklung und wirtschaftliche Potenziale beobachtbar, in dem die neuen Wachstums- und Beschäftigungspotenziale im Landwirtschafts- bzw. Bioenergiesektor hervorgehoben werden. In Industrieländern wird die verstärkte energetische Nutzung von Biomasse als Chance gesehen, die Wirtschaftszweige der Land-

und Forstwirtschaft neu zu beleben und Arbeitsplätze zu sichern (DBV, 2004). Diese Begründungszusammenhänge spielen sowohl in den USA als auch in der Europäischen Union eine wichtige Rolle, da so nicht zuletzt neue bzw. fortgesetzte Agrarsubventionen legitimiert werden können (Koplow; 2007; Kutas et al., 2007).

Auch auf Seiten der Schwellen- und Entwicklungsländer finden Ausbau und Förderung einer spezialisierten Energielandwirtschaft gewichtige Fürsprecher. Die vielfach agrarisch geprägten Länder betonen vor allem die nationalen Entwicklungschancen, die sich aus Beschäftigungseffekten in der Landwirtschaft und den möglichen Wachstumspotenzialen einer exportorientierten Produktion von Energiepflanzen und Biokraftstoffen ergeben (Lula da Silva, 2007). Es wird argumentiert, dass die naturräumlichen Bedingungen, das regionale Klima, die Verfügbarkeit von land- und forstwirtschaftlichen Flächen sowie niedrige Lohnkosten komparative Kostenvorteile auf dem Weltmarkt ergeben, was globale Absatzmöglichkeiten bis hin zu gezielten Handelspartnerschaften mit nachfragenden Industrieländern ermöglichen würde (Mildner und Zilla, 2007; Mathews, 2007). So setzen vor allem die großen Agrarproduzenten unter den Schwellen- und Entwicklungsländern wie Brasilien, Indonesien, Malaysia, Südafrika oder Argentinien große Hoffnungen in einen sich entwickelnden Weltmarkt für Biokraftstoffe. Auch wenn dieser Entwicklungsdiskurs in jüngster Vergangenheit aufgrund möglicher sozialer und ökologischer Folgen (Stichworte: „Teller statt Tank“, „Tortilla-Aufstände“, „Abholzung des Regenwaldes“ usw.) in die Defensive gedrängt wurde, spielt das Argument um neue Entwicklungschancen durch Bioenergie nach wie vor eine große Rolle.

Jenseits dieser vor allem volkswirtschaftlichen Erwägungen sehen überdies multinationale Unternehmen erhebliche Geschäftspotenziale in den Bereichen der Agrochemie und der Pflanzenbiotechnologie (Bayer CropScience, 2006; Economist, 2008a). Das führt zu teilweise deckungsgleichen Interessen zwischen agrarpolitischen und energiepolitischen Akteuren und stärkt die Präsenz und Durchsetzungskraft dieses Diskurses.

In der Zusammenschau finden sich zwischen den einzelnen Diskursen und den Interessen der sie tragenden Akteure vielfältige Überschneidungen. Häufig wird suggeriert, dass Bioenergie als solche – ohne weiter zu differenzieren – gleichzeitig positive Wirkungen in einer Reihe von Problemfeldern entfalten könnte („win-win-win“). Wechselwirkungen, Zielkonflikte und Risiken werden, teils aus Unwissenheit, teils aus strategischem Kalkül ausgeblendet. Unterschiedliche Interessengruppen konkurrieren dabei darum, das Thema Bioenergie zu besetzen und ihren Einfluss auf einschlägige politische Entscheidungsprozesse geltend zu machen.

Auffällig ist, dass in der öffentlichen Debatte um alternative Energien noch immer kaum zwischen unterschiedlichen Produktions- und Nutzungsformen von Bioenergie unterschieden wird und vor allem flüssige Biokraftstoffe häufig – zumindest implizit – mit Bioenergie allgemein gleichgesetzt werden. Noch viel weniger wird zwischen dem Einsatz in grundsätzlich unterschiedlichen Energiesektoren wie Strom/Elektrizität, Wärme und Transport/Verkehr differenziert. Dies zeigt sich auch an der bisherigen engen Ausrichtung der Bioenergiepolitik auf den Verkehrssektor und auf Flüssigkraftstoffe. Bisher ungekannte Allianzen unterschiedlicher Interessengruppen wie etwa von Automobilindustrie und Umweltschützern oder von Interessenvertretern der Landwirtschaft und Energieunternehmen konnten bestimmten Positionen besonderen Nachdruck verleihen. Entsprechend erscheint eine Politik für die Förderung von „Bioenergie“ eine für alle Beteiligten lohnenswerte Strategie. Ob aber gegenwärtig tatsächlich eine sinnvolle und effektive Bioenergiepolitik im Sinne einer kohärenten Förderung von Klimaschutz und Energieversorgung bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Prinzipien nachhaltiger Entwicklung betrieben wird, ist eine offene Frage.

2.2 Bioenergie im Kontext nachhaltiger globaler Energie- und Landnutzungssysteme

Bioenergie ist, gemessen an ihren vielfachen Wechselwirkungen, die komplexeste aller bekannten erneuerbaren Energieformen. Ebenso wie der potenzielle Nutzen der Bioenergie scheint auch das Risiko weitreichender Fehlentwicklungen hoch. Aus diesem Grund ist es umso dringlicher, die Frage nach einer global nachhaltigen Nutzung der Bioenergie zu stellen: Was sollte eine energetische Nutzung von Biomasse leisten, was kann sie leisten, und wo liegen ihre Risken und Grenzen?

Zunächst einmal ist Bioenergie eine Energieform. Wie der WBGU bereits in früheren Gutachten gezeigt hat, ist eine globale Energiewende zur Nachhaltigkeit unerlässlich, um die natürlichen Lebensgrundlagen der Menschheit zu schützen und die Energiearmut in Entwicklungsländern zu beseitigen (WBGU, 2003a). Eine verstärkte Nutzung der Bioenergie muss sich daher zuallererst daran messen lassen, ob und wie weit sie zu einer solchen globalen Energiewende in Richtung Nachhaltigkeit beiträgt.

Ein nachhaltiges Energiesystem muss in eine allgemein nachhaltige Entwicklung eingebettet sein, damit die Nutzung der Bioenergie nicht zu Lasten

anderer Nachhaltigkeitsdimensionen geht. Auch ist die energetische Nutzung nicht die einzige Nutzungsform von Biomasse. Die Frage nach einer nachhaltigen Bioenergienutzung ist daher nur ein Teilaspekt der weitergehenden Frage, auf welche Weise und für welche Zwecke die zwar erneuerbare, jedoch nicht unbegrenzt verfügbare globale Biomasse genutzt werden sollte, um eine global nachhaltige Entwicklung zu ermöglichen.

Die folgenden Abschnitte beleuchten diejenigen Bereiche der Bioenergienutzung, in denen der WBGU einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung für möglich hält und die daher den Schwerpunkt der Analyse des Gutachtens bilden.

2.2.1 Bioenergie, Energiewende und Klimaschutz

Ein wirksamer Klimaschutz ist eine unbedingte Voraussetzung, um eine global nachhaltige Entwicklung überhaupt zu ermöglichen (WBGU, 2007). Um einen gefährlichen Klimawandel noch zu verhindern, muss innerhalb der nächsten zehn Jahre eine Trendumkehr und bis 2050 eine Halbierung der globalen Treibhausgasemissionen gegenüber dem Jahr 1990 erreicht werden. 56,6 % der globalen Treibhausgasemissionen sind derzeit (2004) CO_2-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Insgesamt trägt die zentrale Energieerzeugung 25,9 % zu den globalen THG-Emissionen bei, der Transport 13,1 % und die Industrie 19,4 % (IPCC, 2007c). Ein Umbau der Energiesysteme ist daher zur Erreichung der Klimaschutzziele unausweichlich (WBGU, 2003a, b).

Zwei weitere für den Klimaschutz sehr relevante Sektoren sind der Forstbereich und die Landwirtschaft, die mit 17,4 % bzw. 13,5 % zu den globalen Treibhausgasemissionen beitragen. Die Emissionen aus dem Forstbereich sind dabei überwiegend CO_2-Emissionen aus der fortschreitenden Entwaldung, die aus der Landwirtschaft je etwa zur Hälfte Methanemissionen und Lachgasemissionen (IPCC, 2007c). Ob die Klimaschutzziele erreicht werden können, hängt daher nicht nur von der Transformation der Energiesysteme, sondern in erheblichem Maß auch von der zukünftigen Entwicklung der globalen Landnutzung und Landbewirtschaftung ab.

Bioenergie, soweit sie sich nicht auf die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen beschränkt, ist direkt an die Landnutzung gekoppelt und hat daher das Potenzial, auch in diesen beiden Sektoren zu einer Veränderung der Emissionen zu führen. Bioenergie bildet somit eine Schnittstelle zwischen den beiden größten Treibern des Klimawandels, den globalen Energiesystemen und der globalen Landnutzung.

2.2.2 Bioenergie, Energiewende und Energiearmut

Ein weiteres Ziel der globalen Energiewende ist die Überwindung der Energiearmut in Entwicklungsländern. Energiearmut umfasst den Mangel an ausreichenden Wahlmöglichkeiten beim Zugang zu erschwinglichen, zuverlässigen, qualitativ hochwertigen, sicheren, gesundheitlich unbedenklichen und umweltschonenden Energiedienstleistungen zur Deckung der Grundbedürfnisse (WBGU, 2003a). Der Zugang zu moderner Energie ist ein wesentlicher Bestandteil der Armutsbekämpfung und Voraussetzung für das Erreichen der Milleniums-Entwicklungsziele (WBGU, 2003a). Gegenwärtig sind ca. 2,5 Mrd. Menschen auf Biomasse als primäre Energiequelle zum Kochen angewiesen, in vielen Ländern, vor allem in Subsahara-Afrika, macht die Biomasse sogar mehr als 90 % des Energiekonsums der Haushalte aus (IEA, 2006b). Dabei handelt es sich überwiegend um traditionelle Bioenergienutzung, die vielerorts durch hohe gesundheitliche Gefahren und ineffiziente Technologien gekennzeichnet ist (Kap. 8.2). Eine Weiterentwicklung der bestehenden Bioenergienutzung oder ihr Ersatz durch emissionsarme Energieformen ist aus Sicht des WBGU zur Überwindung der Energiearmut unbedingt geboten.

2.2.3 Spezifische Eigenschaften von Biomasse

Da die in der Biosphäre jährlich erneuerte Biomasse begrenzt ist und ihre energetische Nutzung nur eine von verschiedenen Nutzungsformen darstellt, ist ein Ausbau der Energiepflanzenproduktion stets im Kontext konkurrierender Erfordernisse zu bewerten. Insbesondere durch die unbedingte Notwendigkeit, eine ausreichende Produktion von Nahrungsmitteln zu gewährleisten, ist die für den Energiepflanzenanbau zur Verfügung stehende Landfläche begrenzt. Auch ist die pro Fläche erreichbare Energieausbeute nicht unbegrenzt steigerbar, da der Wirkungsgrad der Photosynthese bei der Umwandlung der eingestrahlten Sonnenenergie in Biomasse einer theoretischen Höchstgrenze unterliegt. Daher ist es umso wichtiger, die Bioenergie nicht als bloßen quantitativen Beitrag zur Energiemenge zu sehen, sondern allgemein die qualitativen Eigenschaften von Biomasse daraufhin zu überprüfen, wie sie zu den Zielen eines nachhaltigen Energiesystems beitragen können.

Eigenschaften von Biomasse als Energieträger

Pflanzen sind in der Lage, ohne technologischen Aufwand Solarenergie aufzunehmen und zu speichern.

Diese Eigenschaft kann sich der Mensch durch die Verbrennung der Biomasse in verschiedenen Formen nutzbar machen. Da weder die Umwandlung noch die Speicherung an Technologie gebunden sind, war Bioenergie bereits in der frühen Menschheitsgeschichte nutzbar. Heute wird Bioenergie überwiegend von armen Menschen genutzt, für die sie eine erschwingliche und leicht handhabbare Energieform darstellt. Die Nutzungseigenschaften von Biomasse ähneln stark den fossilen Energieträgern, die letztlich gespeicherte Biomasse aus prähistorischen Zeiten sind. Insbesondere ist Biomasse nach Bedarf einsetzbar. Daher kann ihr auch in komplexen Energiesystemen eine wichtige Rolle bei der Sicherung der Energieversorgung zukommen, indem sie bei zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien die fluktuierende Einspeisung von Wind- und Solarenergie in der Stromversorgung ausgleicht und ergänzt.

Eigenschaften von Biomasse als Kohlenstoffsenke und Kohlenstoffspeicher

Die Energiespeicherung der Pflanzen geht mit einer Speicherung von Kohlenstoff einher, der als CO_2 aus der Luft entnommen wird. Wird die Biomasse energetisch genutzt, wird das gespeicherte CO_2 wieder freigesetzt. Wie auch bei der Nutzung fossiler Energieträger, kann das CO_2 mit hohem technologischem Aufwand bei der Energieerzeugung abgetrennt und eingelagert werden. Bei der Erzeugung von Biomethan ist eine teilweise Abtrennung von CO_2 ohnehin notwendig, um das Gas nutzbar zu machen. Biomasse bietet jedoch auch die Möglichkeit, mit geringem technologischem Aufwand CO_2 temporär zu speichern, wenn ganz oder teilweise auf die energetische Nutzung verzichtet wird bzw. diese verzögert erfolgt. Je nach Verwendung und Lagerung der Biomasse können hier Speicherungsdauern von mehreren Jahrhunderten, z.B. Holz und sogar bis zu tausenden von Jahren bei Holzkohle erreicht werden Zum gegenwärtigen Zeitpunkt gibt es kein relevantes technisches Verfahren, mit dem wie durch Pflanzen CO_2 direkt aus der Atmosphäre entfernt werden kann

Eigenschaften von Biomasse als Rohstoff

Biomasse wird auch als Rohstoff für die verarbeitende und chemische Industrie sowie im Baugewerbe verwendet. Vor allem in Entwicklungsländern dient insbesondere Holz als leicht verfügbarer Bau- und Rohstoff. Eine stoffliche Nutzung von Biomasse ist auch deshalb von klimapolitischer Relevanz, da sie neben der Kohlenstoffspeicherung auch die Nutzung emissionsintensiver Materialien wie etwa Zement vermeiden kann.

Substituierbarkeit von Biomasse

Die unterschiedlichen qualitativen Eigenschaften von Biomasse verdeutlichen, dass eine geeignete Nutzung von Biomasse grundsätzlich positive Beiträge zum Klimaschutz und zur Überwindung von Energiearmut leisten kann. Es ist jedoch wichtig festzuhalten, dass diese Ziele auch ohne die Nutzung von Biomasse durch andere Maßnahmen verfolgt werden können, z.B. durch eine Erhöhung der Effizienz in der Energieversorgung, den Einsatz anderer erneuerbarer Energien, die technologische Abtrennung und Speicherung von CO_2 aus fossilen Quellen usw. Demgegenüber gibt es Eigenschaften und Nutzungen von Biomasse, die nicht ersetzbar sind. Dies betrifft z.B. die Biomasse als zentralen Bestandteil von Ökosystemen oder die Biomasse als Nahrungs- und Futtermittel. Die Nutzung von Biomasse für Klimaschutz und Energieversorgung darf daher im Sinne der Nachhaltigkeit nur auf eine Weise erfolgen, bei der die nicht substituierbaren Nutzungen und Eigenschaften der Biomasse weiterhin gewährleistet sind. Das folgende Kapitel erläutert die Leitplanken und Leitlinien, die aus Sicht des WBGU für eine global nachhaltige Bioenergienutzung eingehalten werden sollten.

Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Bioenergie 3

Der WBGU leitet die Anforderungen an eine nachhaltige Bioenergienutzung im Wesentlichen aus dem von ihm entwickelten Leitplankenkonzept ab (WBGU, 1995). Darunter versteht der Beirat quantitativ definierte Schadensgrenzen, deren Überschreitung nicht tolerierbare oder gar katastrophale Folgen hätte, etwa eine Erhöhung der globalen Mitteltemperatur um mehr als 2°C, bezogen auf den vorindustriellen Wert. Nachhaltige Entwicklungspfade verlaufen innerhalb des durch die Leitplanken eingegrenzten Bereichs. Dahinter steht die Einsicht, dass es kaum möglich ist, eine wünschenswerte, nachhaltige Zukunft positiv, also im Sinne eines zu erreichenden Ziels oder Zustands zu definieren. Man kann sich aber auf die Abgrenzung eines Bereichs einigen, der als inakzeptabel anerkannt wird und den die Gesellschaft vermeiden will. Wenn das System sich auf Kollisionskurs mit einer Leitplanke befindet, sollen Maßnahmen ergriffen werden, um eine Verletzung der Leitplanken zu verhindern.

Die Einhaltung der in diesem Kapitel vorgestellten Leitplanken ist jedoch nur ein notwendiges, aber nicht hinreichendes Kriterium für Nachhaltigkeit (WBGU, 2000). Denn sowohl die Anforderungen an die sozioökonomische als auch an die ökologische Dimension von Nachhaltigkeit lassen sich nicht immer stringent als Leitplanken formulieren. Im sozioökonomischen Bereich etwa sind viele Anforderungen an eine nachhaltige Bioenergiepolitik nicht quantifizierbar. Zudem sind die meisten der grundsätzlich quantifizierbaren sozioökonomischen Anforderungen nicht in eine globale Leitplanke transformierbar, da sie landes- und situationsabhängig sind. Aber auch ökologische Schadensgrenzen lassen sich nicht in allen Fällen als Leitplanken formulieren, etwa wegen zu großer regionaler Unterschiede oder weil sich kein überzeugender globaler Indikator benennen lässt. Aus den genannten Gründen benennt der WBGU über Leitplanken hinaus „weitere Nachhaltigkeitsanforderungen“, die zusätzliche, nicht als Leitplanken beschreibbare Kriterien für eine nachhaltige Bioenergienutzung liefern. Dies betrifft beispielsweise verschiedene Aspekte der Landnutzung oder die Einhaltung von Sozialstandards.

3.1 Ökologische Nachhaltigkeit

3.1.1 Leitplanke für den Klimaschutz

Aus Sicht des WBGU sind Auswirkungen von Klimaänderungen intolerabel, die mit einem mittleren globalen Anstieg der bodennahen Lufttemperatur um mehr als 2°C gegenüber dem vorindustriellen Wert oder einer Temperaturänderungsrate von mehr als 0,2°C pro Jahrzehnt verbunden sind. Diese Leitplanke wurde in früheren Gutachten des WBGU ausführlich begründet (WBGU, 1995, 2006). Die Einhaltung dieser Leitplanke erfordert, dass die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre unterhalb von 450 ppm CO_2eq stabilisiert wird. Dafür sollten die globalen Treibhausgasemissionen bis Mitte des Jahrhunderts mindestens halbiert werden.

Ein erheblicher Anteil des durch den Menschen freigesetzten CO_2 löst sich im Meerwasser und führt dort zu einer Versauerung. Um unerwünschte bzw. riskante Veränderungen der marinen Ökosysteme zu vermeiden, sollte der pH-Wert der obersten Meeresschicht in keinem größeren Ozeangebiet um mehr als 0,2 Einheiten gegenüber dem vorindustriellen Niveau absinken. Eine Einhaltung der 2°C-Leitplanke würde gleichzeitig eine Einhaltung der Versauerungsleitplanke nach sich ziehen, sofern nicht nur der gesamte „Korb“ der Treibhausgasemissionen, sondern auch die CO_2-Emissionen separat betrachtet ausreichend reduziert werden (WBGU, 2006).

Eine Bioenergienutzung, die mit dem Klimaschutz begründet wird, sollte an ihrem Beitrag zur Einhaltung der Klimaschutz- und der Versauerungsleitplanke gemessen werden. Dabei ist zu beachten, dass es für die Einhaltung der 2°C-Leitplanke nicht von Belang ist, ob ein bestimmter Wirtschaftssektor (etwa der Verkehr) eine bestimmte Emissionsreduktion erreicht. Ausschlaggebend ist allein die zeitliche Entwicklung der globalen Emissionen und der Treibhausgasaufnahme durch Senken über alle Sektoren hinweg. Für eine realistische Beurteilung des

Klimaschutzbeitrags der Bioenergienutzung muss die Emissionsentwicklung in allen Sektoren betrachtet werden. Zur Einhaltung der Versauerungsleitplanke ist darüber hinaus die Auswirkung der Bioenergienutzung auf den globalen Kohlenstoffkreislauf zu beachten.

3.1.2 Leitplanke für den Biosphärenschutz

Für den Biosphärenschutz hat der Beirat folgende Leitplanke vorgeschlagen: 10–20 % der weltweiten Fläche terrestrischer Ökosysteme (bzw. 20–30 % der Fläche mariner Ökosysteme) sollten für ein globales, ökologisch repräsentatives und effektiv betriebenes Schutzgebietssystem ausgewiesen werden (WBGU, 2000, 2006). Zudem sollten auch etwa 10–20 % der Flussökosysteme inklusive ihrer Einzugsgebiete dem Naturschutz vorbehalten sein (WBGU, 2003a).

Diese Leitplanke hat ihre Begründung u. a. in der Erkenntnis, dass Ökosysteme und ihre biologische Vielfalt für die Menschheit überlebenswichtig sind, weil sie eine Vielzahl an Funktionen, Dienstleistungen und Produkten bereitstellen (MA, 2005a). Insbesondere Schutzgebiete sind als Instrument nachhaltiger Entwicklung unverzichtbar (CBD, 2004b; Kap. 5.4). Dabei müssen sich der Schutz und die nachhaltige Nutzung biologischer Vielfalt keineswegs ausschließen: Je nach ökologischen Gegebenheiten sind Schutz und Nutzung biologischer Vielfalt in unterschiedlichem Ausmaß miteinander vereinbar (WBGU, 2000). Dementsprechend hat der IUCN (1994) ein abgestuftes Kategoriensystem für Schutzgebiete erarbeitet, das unterschiedliche Verhältnisse von Schutz und nachhaltiger Nutzung zulässt.

Besonders dringlich ist der Schutz in den Brennpunkten biologischer Vielfalt, in denen sich auf geringer Fläche sehr viele wild lebende Arten befinden, ein hoher Grad an Endemismus oder einzigartige Ökosysteme zu finden sind und die daher für die biologische Vielfalt besonders wertvoll sind (Hotspots: Mittermeier et al., 1999; Myers et al., 2000). Der Schutz sollte zudem die besonders schutzwürdigen Arten sowie Gebiete einschließen, in denen noch großflächig ungestörte Ökosysteme existieren (Wildnisgebiete, z.B. tropische und boreale Wälder). Für die globale Ernährungssicherheit ist darüber hinaus die Erhaltung der „Genzentren“ wichtig, in denen eine große genetische Vielfalt von Kulturpflanzen oder ihrer wild lebenden Verwandten vorkommt (Vavilov, 1926; Stolton et al., 2006). Die internationale Gemeinschaft hat sich darauf geeinigt, bis 2010 ein solches Schutzgebietssystem aufzubauen (Kap. 10.5; CBD, 2004b). Es ist positiv zu bewerten, dass in den letzten Jahren die Zahl der Schutzgebiete und ihr Flächenanteil stark gestiegen sind, so dass letzterer derzeit bei ca. 12 % der globalen Landfläche liegt (Kasten 5.4-1). Viele dieser Schutzgebiete erweisen sich bei näherem Hinsehen aber als „paper parks“ (Dudley und Stolton, 1999a), d.h. sie sind zwar laut Verordnung geschützt, aber das Management vor Ort ist so unzureichend, dass es oft nicht einmal gelingt, den Raubbau an biologischen Ressourcen zu stoppen (z.B. illegaler Holzeinschlag, Raubfischerei). Zudem sind streng genommen nur die Gebiete der Kategorie I–IV mitzurechnen, da die Kategorien V und VI eher den Schwerpunkt auf nachhaltige Nutzung als auf Erhaltung biologischer Vielfalt legen. Die Forderung nach einem „effektiv betriebenen Schutzgebietssystem“ ist daher nur auf einem Bruchteil der 12 % erfüllt (Kasten 5.4-1).

Analog zu den im Rahmen der Biodiversitätskonvention vereinbarten Zielen der Global Strategy for Plant Conservation (GSPC) sollte diese globale Leitplanke regional ausdifferenziert und konkretisiert werden (CBD, 2002a; Kap. 10.5). Zu den 16 Zielen der GSPC bis 2010 gehört unter anderen, dass

- 10 % aller ökologischen Regionen der Welt geschützt sein sollen,
- 50 % der für die Pflanzenvielfalt wichtigsten Gebiete geschützt sein sollen. Mögliche Kriterien für die Auswahl dieser Gebiete wären Artenreichtum, Endemismus sowie Einzigartigkeit der Habitate und Ökosysteme.
- 60 % der gefährdeten Arten *in situ* erhalten sein sollen (z.B. durch Schutzgebiete).
- 70 % der genetischen Vielfalt der sozioökonomisch wertvollen Pflanzenarten erhalten sein soll (Genbanken und On-farm-Erhaltung).

Allerdings kann auch ein noch so gut funktionierendes Schutzgebietssystem den Verlust der biologischen Vielfalt nicht stoppen. Hinzu kommen muss zum einen die Integration der Schutzgebiete bzw. der Schutzgebietssysteme in die umgebende Landschaft (CBD, 2004b) und zum anderen die Integration des Schutzgedankens in die Fläche, durch differenzierte Anwendung nachhaltiger Landnutzung auf allen land- oder forstwirtschaftlich genutzten Flächen. Das Ziel ist ein „integriertes, nachhaltiges Management von Land, Wasser und lebenden Ressourcen“ (Ecosystem Approach: CBD, 2000, 2004a). In diesem Sinn werden zur Sicherstellung der Nachhaltigkeit der Landnutzung zusätzliche Leitlinien benötigt, die der Naturschutzdimension Rechnung tragen (Kap. 3.5).

3.1.3 Leitplanke für den Bodenschutz

Wegen der Bedeutung von Bodenschutzmaßnahmen für die künftige Ernährungssicherung sind Leitplan-

ken des weltweiten Bodenschutzes sinnvoll. Damit sind konkrete Werte gemeint, deren Überschreitung zu einem irreversiblen und für die Menschen existenzbedrohenden Zustand der Umwelt führen würde (WBGU, 2004a; UBA, 2008a). Schwertmann et al. (1987) setzten die Toleranzgrenze für anthropogen bedingte Bodendegradation so fest, dass das natürliche Ertragspotenzial in einem Zeitraum von 300–500 Jahren nicht entscheidend geschwächt wird. Bei der Konkretisierung dieser Leitplanke ist zwischen der Bodendegradation durch Erosion und durch Versalzung, den beiden größten Gefährdungen von Böden, zu unterscheiden.

Für diese beiden Faktoren hat der WBGU Toleranzgrenzen vorgeschlagen (WBGU, 2004a). Für die Bodenerosion bedeutet dies, dass streng genommen nicht mehr Boden abgetragen bzw. anderweitig degradiert werden dürfte, als neu gebildet wird, da dies langfristig das Ertragspotenzial schwächen würde. Da die Bodenbildung aber in geologischen Zeiträumen abläuft, kann dies nur ein Fernziel darstellen. Je nach Gründigkeit der Böden sieht der WBGU z.B. in der gemäßigten Zone die Toleranzgrenze bei einem Bodenverlust von 1–10 t pro ha und Jahr (Schwertmann et al., 1987). Als Toleranzgrenze in Bezug auf Bodenversalzung in der Bewässerungslandwirtschaft schlägt der WBGU (2004a) vor, dass die Salzkonzentration und -zusammensetzung innerhalb von 300–500 Jahren nicht über ein Maß ansteigen sollte, das von gängigen Nutzpflanzen noch toleriert werden kann.

3.1.4 Weitere ökologische Nachhaltigkeitsanforderungen

Nicht alle ökologischen Nachhaltigkeitsdimensionen lassen sich als global gültige Leitplanken formulieren, etwa wegen zu großer regionaler Unterschiede oder weil kein überzeugender globaler Indikator anwendbar ist. Daher benennt der WBGU hier weitere ökologische Nachhaltigkeitsanforderungen für eine nachhaltige Bioenergienutzung.

Zum Beispiel geht es bei der nachhaltigen Nutzung von Wasserressourcen im Zusammenhang mit Bioenergie vor allem um den Umgang mit Bewässerungswasser, wenn Konkurrenzen zur Wassernutzung für die Nahrungsproduktion drohen. Der WBGU hält die in der Literatur zu findenden Wasserstressindikatoren nicht für die Quantifizierung einer global gültigen Leitplanke geeignet. Auch in Regionen mit hohem Wasserstress können durch gezielte Maßnahmen viele der negativen Auswirkungen von Bewässerung vermieden werden und Nachhaltigkeit erreicht werden. Zudem berücksichtigen die Indikatoren nicht das „grüne“ Wasser, also Niederschlagswasser, das den Pflanzen als Bodenfeuchte zur Verfügung steht.

Auch bei den global formulierbaren Leitplanken, wie etwa bei der Erhaltung biologischer Vielfalt oder dem Bodenschutz muss die Anwendung der globalen Leitplanke im jeweiligen lokalen und agroökologischen Kontext betrachtet werden. Im Sinne des ökosystemaren Ansatzes der CBD (2000) muss das Ziel ein „integriertes, nachhaltiges Management von Land, Wasser und lebenden Ressourcen“ sein, das den Menschen als integrale Komponente vieler Ökosysteme einschließt. Dazu können die Addis-Abeba-Prinzipien und Leitlinien zur nachhaltigen Nutzung biologischer Vielfalt herangezogen werden (CBD, 2004d; Kap. 10.5), ebenso wie die Definition der FAO zu nachhaltiger Landnutzung: „Sustainable land management combines technologies, policies and activities aimed at integrating socio-economic principles with environmental concerns so as to simultaneously: (1) maintain or enhance production/services (Productivity); (2) reduce the level of production risk (Security); (3) protect the potential of natural resources and prevent degradation of soil and water quality (Protection); (4) be economically viable (Viability); (5) and socially acceptable (Acceptability)“ (Smyth und Dumanski, 1993).

Die Regelungen auf europäischer und deutscher Ebene sind deutlich ausdifferenzierter und konkreter formuliert. In der EU wird im Rahmen der Cross-Compliance die Gewährung von Direktzahlungen an Landwirte an die Einhaltung verbindlicher Vorschriften über den Umweltschutz, die Nahrungs- und Futtermittelsicherheit, die Tiergesundheit und den Tierschutz geknüpft (BMELV, 2006; UBA, 2008a). Diese Konditionierung der Beihilfezahlungen stellt ein umweltpolitisches Steuerungsinstrument dar (SRU, 2008). Für die deutsche Landwirtschaft ist in verschiedenen Gesetzen und Verordnungen die sogenannte „gute fachliche Praxis“ im Sinne der von Landwirten einzuhaltenden ökologischen und sicherheitstechnischen Standards definiert (SRU, 2008). Allerdings sind viele Regelungen der guten fachlichen Praxis in Gesetzen und Verordnungen immer noch sehr unbestimmt formuliert (SRU, 2008).

Die bestehenden Regelungen bzw. grundlegenden Arbeiten sollten genutzt werden, um konkrete, international anerkannte Managementregeln oder Standards für nachhaltige Landnutzung herzuleiten. Dabei sollte auch die Klimabilanz der Anbausysteme berücksichtigt werden, da z.B. die Intensivierung von Landnutzung N_2O-Emissionen als Folge von Stickstoffdüngung und CO_2-Emissionen durch Umbruch von Grünland mit sich bringt.

3.2 Sozioökonomische Nachhaltigkeit

3.2.1 Leitplanke zur Sicherung des Zugangs zu ausreichend Nahrung

Zugang zu Nahrung für alle Menschen

Der Ausbau der Bioenergienutzung kann sich auf die Nahrungsproduktion und besonders in Low-Income Food-Deficit Countries negativ auf die Ernährungssicherheit auswirken, weil Landflächen, Wasserressourcen und landwirtschaftliche Arbeitsmittel (z.B. Maschinen, Düngemittel, Saatgut, Futtermittel, Treibstoffe) der Nahrungsmittelproduktion zugunsten des Energiepflanzenanbaus entzogen werden. Die Sicherung der Welternährung muss aus Sicht des WBGU Vorrang vor allen anderen Nutzungsformen der zur Bewirtschaftung geeigneten globalen Landflächen haben. Bioenergie ist durch andere Energieträger substituierbar, Nahrungsmittel sind dies aber nicht. In der FAO-Definition bedeutet Ernährungssicherheit, dass alle Menschen zu jeder Zeit ungehinderten physischen, sozialen und ökonomischen Zugang zu ausreichender und ausgewogener Ernährung haben sollen, um ein aktives und gesundes Leben zu führen (FAO, 2008b). Dementsprechend schlägt der WBGU hier als Leitplanke vor, dass für alle Menschen Zugang zu ausreichend Nahrung gesichert sein soll.

Notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzung dafür ist, dass genügend Nahrung produziert wird, um den Kalorienbedarf aller Menschen zu decken. Für die Operationalisierung der Leitplanke lässt sich daraus schließen, dass global mindestens so viel landwirtschaftliche Nutzfläche zur Verfügung stehen muss, um für alle Menschen eine durchschnittliche Kalorienversorgung von 2.700 kcal pro Person und Tag (entsprechend etwa 11,3 MJ pro Person und Tag) zu ermöglichen (Kasten 3.2-1). Nach Angaben der FAO (2003b) liegt die globale Nahrungsmittelproduktion derzeit bei ca. 2.800 kcal pro Person und Tag (Beese, 2004). Global gesehen wird derzeit also genügend Nahrungsenergie erzeugt, so dass Hunger und Unterernährung primär ein Zugangs- bzw. Verteilungsproblem darstellen.

Abhängigkeit des Flächenbedarfs von Ernährungsweise und Flächenproduktivität

Wesentlich für die Höhe der Potenziale zur Versorgung der Weltbevölkerung mit ausreichender und ausgewogener Nahrung sind die Ernährungsgewohnheiten der Menschen sowie die Flächenproduktivität. So hängt das Ernährungspotenzial der vorhandenen Agrarflächen dabei wesentlich von der Nutzungsform ab. Beispielsweise wird der größte Teil der Maisernte in Nordamerika und Europa verfüttert. Der Mais liefert also nur auf dem Umweg über die Fleischproduktion Nahrung für den Menschen. Bei dieser „Veredelung“ geht ein Großteil der ursprünglich im Mais vorhanden Nahrungskalorien verloren. Bereits heute wird etwa ein Drittel der Weltgetreideernte als Futtermittel eingesetzt. Insgesamt muss die globale Nahrungsproduktion bis 2030 um 50 % und bis 2050 um etwa 80 % gesteigert werden. Dies muss im Wesentlichen durch eine Steigerung der Flächenproduktivität gelingen (Kap. 5.2).

Kasten 3.2-1

Exkurs: Kalorienbedarf eines Menschen

In der Vorbereitung des Welternährungsgipfels 1996 gab es intensive Diskussionen um Mindestwerte der Kalorienverfügbarkeit. Der ursprüngliche Plan, die Verfügbarkeit von 2.700 kcal pro Person und Tag (entsprechend etwa 11,3 MJ pro Person und Tag) als Ziel zu formulieren, wurde aufgegeben, da eine durchschnittliche Pro-Kopf-Kalorienversorgung die Ungleichheiten in der Versorgung innerhalb eines Landes verdeckt und zur Nahrungsqualität keine Aussage macht. Dennoch ist eine Operationalisierung einer „Ernährungsleitplanke“ ohne einen solchen Wert kaum möglich.

Der Energiebedarf eines Menschen setzt sich aus dem Basisenergieverbrauch (Grundumsatz), abhängig von Alter, Geschlecht und Gewicht, der körperlichen Aktivität sowie den persönlichen Lebensumständen (Schwangerschaft, Stillzeit) zusammen (FAO, 2004). Die körperlich Aktivität hat einen erheblichen Anteil am Energieverbrauch des Menschen und wird als Physical Activity Level (PAL) gemessen. Die üblichen PAL-Werte erstrecken sich von 1,2 für ausschließlich sitzende Lebensweise bis zu 2,4 für Schwerstarbeiter (DGE, 2007). Die Richtwerte für die durchschnittliche erforderliche Energiezufuhr liegen bei Männern bzw. Frauen im Alter von 19–25 Jahren bei 3.000 bzw. 2.400 kcal. Bei schwerer körperlicher Arbeit kann dieser Wert für einen Mann knapp 4.000 kcal erreichen. Für Männer bzw. Frauen im Alter von 25–51 Jahren liegen die Richtwerte für die durchschnittliche Energiezufuhr bei 2.900 bzw. 2.300 kcal und für Männer bzw. Frauen im Alter von 51–65 Jahren bei 2.500 bzw. 2.000 kcal (DGE, 2007).

In Industrieländern beträgt die tatsächliche durchschnittliche Kalorienzufuhr bei ca. 3.400 kcal, in vielen Entwicklungsländern liegt dieser Wert bei unter 2.000 kcal (Äthiopien liegt mit ca. 1.600 kcal am unteren Ende) (Meade und Rosen, 1997; FAO, 2006a).

3.2.2
Leitplanke zur Sicherung des Zugangs zu modernen Energiedienstleistungen

Zur Sicherstellung elementarer Energiedienstleistungen ist nach Auffassung des WBGU (2003a) der Zugang zu modernen Energieformen notwendig. Daher schlägt der WBGU folgende Leitplanke vor: Der Zugang zu moderner Energie sollte für alle Menschen gewährleistet sein. Dazu müssen vor allem der Zugang zu Elektrizität sichergestellt und die Nutzung gesundheitsschädigender Biomasse durch moderne Brennstoffe ersetzt werden. Der WBGU erachtet mittelfristig ein Endenergiemenge von 700–1.000 kWh pro Kopf und Jahr als Minimum für den elementaren individuellen Bedarf.

Die Ermittlung eines individuellen Mindestbedarfs an Energie pro Kopf ist mit erheblichen Problemen normativer wie methodisch-technischer Art behaftet. So müssen klimatisch-geographische Aspekte ebenso berücksichtigt werden wie kulturelle, demographische und sozioökonomische Faktoren. Ferner müssen bei der Überführung der Energiedienstleistungen in die benötigen Energiemengen Annahmen über die eingesetzten Technologien getroffen werden. Daher gibt es in der Literatur nur wenige differenzierte Angaben über solch einen Mindestbedarf. Trotz dieser Probleme erscheint die Ableitung vertretbar (WBGU, 2003a), da dieser Mindestbedarf nicht als Ziel definiert wird, sondern als absolutes Minimum, dessen Verfehlung als nicht nachhaltig eingestuft werden muss.

Der WBGU schätzt den absoluten individuellen Mindestbedarf an Energie bei Einsatz effizienter Technologien gemäß Stand der Technik auf ca. 450 kWh pro Kopf und Jahr (in einem 5-Personen-Haushalt) bzw. 500 kWh pro Kopf und Jahr (in einem 2-Personen-Haushalt; WBGU, 2003a). Der Wert liegt damit in dem Intervall von 300–700 kWh pro Kopf und Jahr, das auch in der Literatur meist angegeben wird. 450 bzw. 500 kWh pro Kopf und Jahr können nur ein absolutes Minimum darstellen, da Heizen, Transport und die Unterstützung haus- und subsistenzwirtschaftlicher Tätigkeiten unberücksichtigt bleiben. Daher liegt die vom WBGU angesetzte Leitplanke von 700–1.000 kWh pro Kopf und Jahr über diesem Wert.

3.2.3
Leitplanke zur Vermeidung von Gesundheitsschäden durch Energienutzung

Der Sozialpakt formuliert Gesundheit als fundamentales Menschenrecht (Art. 12), aber ebenso das Recht auf einen angemessenen Lebensstandard (Art. 11) und meint damit auch den Zugang zu Energie, z. B. um zu kochen und zu heizen. In vielen Ländern und Regionen der Erde ergibt sich daraus ein Spannungsverhältnis, weil keine „saubere“ oder der Nutzungsform angepasste Energie zur Verfügung steht. Die dort eingesetzten Energieträger können die menschliche Gesundheit erheblich belasten. Insbesondere bei der Verfeuerung fossiler Brennstoffe und von Biomasse entsteht Luftverschmutzung durch Gase und Partikel, die erhebliche gesundheitliche Risiken birgt (WBGU, 2003a).

Zur Formulierung von Gesundheitsleitplanken im Sinn nicht tolerierbarer Grenzen der Gesundheitsbelastung als Folge von Energiegewinnung und -nutzung können DALYs (Disability Adjusted Life Years) herangezogen werden. DALYs sind ein in verringerter Lebenszeit ausgedrücktes Maß für die Gesundheitsbelastung. Sie setzen sich zusammen aus Lebensjahren, die mit Gesundheitseinschränkungen oder Krankheit gelebt werden müssen und den Lebensjahren, die durch vorzeitigen Tod verloren gehen (Murray und López, 1996). Bereits heute werden für städtische Luftverschmutzung und Verschmutzung der Innenraumluft in großen Teilen der Welt Werte unter 0,5 % Anteil an den regionalen DALYs erreicht. Der WBGU schlägt daher als Leitplanke vor, dass der Anteil der regionalen DALYs, welcher durch beide Risikofaktoren verursacht wird, für alle WHO-Regionen und -Subregionen auf unter 0,5 % gesenkt werden soll (WBGU, 2003a).

3.2.4
Weitere sozioökonomische Nachhaltigkeitsanforderungen

Bei der Produktion und Nutzung von Bioenergie gilt es eine Reihe sozioökonomischer Faktoren zu berücksichtigen, um die Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung zu erfüllen.

Entsprechend geht der WBGU auf Maßnahmen zu ihrer Berücksichtigung ein (Standards: Kap. 10.3). Sozioökonomische Nachhaltigkeitskriterien sind im Kontext der Bioenergie sowohl in Industrie- als auch in Entwicklungsländern relevant. Vor allem drei Gründe sprechen jedoch dafür, besonderes Augenmerk auf die Entwicklungsländer zu legen: Erstens sind in Entwicklungsländern die mit traditioneller Biomassenutzung einhergehenden Probleme weit verbreitet und ein erhebliches Entwicklungshemmnis (Kap. 10.8), während traditionelle Bioenergienutzung in Industrieländern kein nennenswertes Problem darstellt. Zweitens gilt das Gleiche für den Zugang zu Energie und zu ausreichender Nahrung. Drittens und vor allem spielt der Agrarsektor in Entwicklungsländern anders als in den meis-

ten Industrieländern eine herausragende Rolle für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung. Während in Niedrigeinkommensländern etwa 20 % des BIP im Agrarsektor erwirtschaftet wird, sind es in Hocheinkommensländern nur 2 % (World Bank, 2008c). Einem Anteil an der Beschäftigung von nur wenigen Prozentpunkten in Industrieländern stehen in etlichen Entwicklungsländern Anteile von über 40 % gegenüber, in einigen sind sogar über 60 % der Beschäftigten im Landwirtschaftssektor tätig (World Bank, 2008c). Hinzu kommt die hohe Bedeutung des Agrarsektors in Entwicklungsländern zur Überwindung extremer Einkommensarmut, denn auf dem Land in Entwicklungsländern leben etwa 700 Mio. Menschen bzw. drei Viertel aller Menschen, die weniger als 1 US-$ pro Tag zur Verfügung haben (World Bank, 2004).

Bei der Gewinnung von Biomasse (zur energetischen Nutzung) spielen die Arbeitsbedingungen vor Ort unter dem Blickwinkel sozialer Nachhaltigkeit eine gewichtige Rolle. So ist es etwa nicht nachhaltig, wenn große Mengen Pestizide eingesetzt und dadurch Plantagenarbeiter und Anwohner gesundheitlich geschädigt werden. Außerdem sollten zumindest die elementarsten Kernstandards der internationalen Arbeitsorganisation ILO eingehalten werden (Sicherheit, Verbot ausbeuterischer Kinderarbeit, Verbot von Sklavenarbeit, elementare Arbeitnehmerrechte usw.). Sozial nicht nachhaltig ist Bioenergieanbau sicher auch dann, wenn Kleinbauern oder indigene Gruppen im Zuge der Errichtung von Plantagen verdrängt und dadurch ihrer Existenzgrundlage beraubt werden.

Auch wirtschaftliche Nachhaltigkeitsaspekte sind besonders für ärmere Länder wichtig. Viele Entwicklungsländer erhoffen sich von der Bioenergie Entwicklungschancen, sei es unmittelbar bei der Bekämpfung ländlicher Armut, durch eine Verringerung der Abhängigkeit vom Import fossiler Brennstoffe oder durch eine Erhöhung der Energieversorgungssicherheit. Chancen werden auch in Bezug auf den Export moderner Bioenergie gesehen, der die wirtschaftliche Entwicklung eines Landes fördern kann. Inwieweit sich diese Hoffnungen erfüllen, ist nicht allein von der ökologischen Nachhaltigkeit des Anbaus, sondern auch ganz wesentlich von den jeweiligen nationalen bzw. lokalen politischen und sozioökonomischen Bedingungen abhängig (Kap. 10.8) Darüber hinaus ist entscheidend, ob ein Ausbau der Bioenergie wirtschaftlich nachhaltig in dem Sinn ist, dass der Sektor dauerhaft auch ohne Subventionierung fortbestehen kann oder ob seine Dauerförderung dazu führt, dass Mittel für sozial und ökonomisch vielversprechendere Verwendungen nicht mehr zur Verfügung stehen.

3.3 Fazit

Der WBGU legt der Bewertung einer nachhaltigen Bioenergiepolitik eine Reihe von Leitplanken im Sinne nicht tolerierbarer Schadensgrenzen zugrunde, die zusätzlich durch weitere Nachhaltigkeitsanforderungen ergänzt werden, die sich nicht stringent als Leitplanke beschreiben lassen. Dieses Konzept bietet aus Sicht des WBGU eine Grundlage zur Operationalisierung von Nachhaltigkeitsanforderungen im Bereich Bioenergie, etwa durch Standards oder völkerrechtliche Regelungen. Auf diesem Konzept aufbauend hat der WBGU zudem eine Modellierung des globalen Energiepflanzenpotenzials durchgeführt (Kap. 6).

Bioenergie, Landnutzung und Energiesysteme: Status Quo und Trends 4

Gegenstand dieses Kapitels ist die Analyse der Entwicklung der heutigen Landnutzung und des globalen Bioenergiesektors. Sie bildet die Ausgangslage für die Auseinandersetzung mit der Frage, inwieweit eine zunehmende Nutzung von Energiepflanzen mit einer nachhaltigen weltweiten Landnutzung in Einklang zu bringen ist. Kapitel 4.1 setzt sich mit dem gegenwärtigen Stellenwert der Bioenergie in den verschiedenen Sektoren der globalen Energiesysteme auseinander. Darin wird auf den derzeitigen Beitrag der Bioenergie zur Deckung des Weltprimärenergiebedarfs und den Handel mit Bioenergieträgern eingegangen (Kap. 4.1.1) sowie die aktuelle globale Bioenergieförderpolitik beleuchtet (Kap. 4.1.2).

In den folgenden Kapiteln werden die globale Landbedeckung (Kap. 4.2.1) und Landnutzung (Kap. 4.2.2) dargestellt. Durch landschaftliche Eingriffe werden auch ökosystemische Faktoren wie die Biodiversität und der Kohlenstoffkreislauf stark beeinflusst, der auch im Hinblick auf die Energiepflanzennutzung relevant ist (Kap. 4.2.3). Die wachsende globale Nachfrage nach Energiepflanzen verstärkt bei begrenzter Verfügbarkeit von Flächen die Konkurrenz zwischen verschiedenen Landnutzungen. Es ist deshalb zu erwarten, dass die verstärkte Nutzung von Energiepflanzen sowohl direkt als auch indirekt über Verdrängungseffekte Auswirkungen auf die Verbreitung natürlicher und naturnaher Ökosysteme hat. Die Auswirkungen direkter Landnutzungsänderungen werden abschließend in Kapitel 4.2.4 bewertet.

4.1 Bioenergie in den globalen Energiesystemen

Bioenergie spielt heute eine wichtige Rolle in der globalen Energieversorgung. Neben der traditionellen Biomassenutzung, die die Menschen seit Jahrtausenden einsetzen, wird Energie immer häufiger aus Reststoffen und Abfällen, aber auch aus speziell angebauten Energiepflanzen gewonnen. Im Folgenden wird gezeigt, wie sich der Bioenergiesektor zur Zeit entwickelt, welche Technologien verfügbar sind oder künftig verfügbar sein werden, wie sich der Handel von biogenen Rohstoffen und verarbeiteten Bioenergieträgern vollzieht und wie staatliche Förderpolitik die globale Nachfrage nach Bioenergie beeinflusst.

4.1.1 Aktuelle Bioenergienutzung – Stand und Trends

4.1.1.1 Bioenergie im globalen Energiesystem

Etwa 10 % der globalen Primärenergienachfrage werden derzeit durch Energie aus Biomasse und Abfall gedeckt. Im Jahr 2005 waren dies ca. 47,2 EJ von insgesamt 479 EJ (GBEP, 2008). Der Löwenanteil entfällt davon auf die traditionelle Biomassenutzung (z.B. Brennholz), die moderne Bioenergie- und Abfallnutzung ist im Vergleich dazu gering. Nach Angaben der Internationalen Energieagentur betrug im Jahr 2005 der Anteil der Bioenergie am Primärenergieverbrauch der OECD-Länder 4 %, in China 13 %, in Indien 29 %, in Lateinamerika und den Entwicklungsländern Asiens 18 % sowie in Afrika 47 % (IEA, 2007a). In vielen Ländern Afrikas südlich der Sahara liegt dieser Anteil im Durchschnitt sogar bei über 90 % der Primärenergieversorgung (MEMD, 2004; IEA, 2007a).

Die hier genannten Werte wurden nach der Wirkungsgradmethode berechnet, die im Vergleich zur methodisch sinnvolleren Substitutionsmethode im Stromsektor erneuerbare Energien unterbewertet und somit die Gesamtbilanz verfälscht (Kasten 4.1-1; Abb. 4.1-1).

Heute decken erneuerbare Energien rund 16,2 % des Weltprimärenergiebedarfs ab. Die Bioenergie spielt mit 61 % an den erneuerbaren Energien global derzeit die wichtigste Rolle aller regenerativen Energiequellen (BP, 2008; GWEC, 2008; REN21, 2008). 94 % der Bioenergie werden im Wärmesektor verwendet, meist zum Kochen und Heizen. Dabei handelt es sich um die so genannte traditionelle Biomassenutzung. Für ca. 2,5 Mrd. Menschen (38 % der

Kasten 4.1-1

Anwendung der Substitutionsmethode

Methodikfragen bei der Berechnung des Primärenergiebedarfs

Der Primärenergiebedarf einer Volkswirtschaft ist eine wichtige wirtschafts- und klimapolitische Kennzahl, seine korrekte Berechnung ist daher von großer Bedeutung. Insbesondere die präzise Ausweisung des Primärenergiebeitrags von Strom aus erneuerbaren Energien stellt aber eine methodische Herausforderung dar. Gegenwärtig werden für die Bilanzierung von Strom zwei verschiedene Methoden verwendet: die Wirkungsgradmethode und die Substitutionsmethode.

Die Wirkungsgradmethode ist international vorherrschend und wurde laut VDI Richtlinie 4661 aus politischen Gründen 1995 auch in Deutschland eingeführt (VDI, 2003). Zuvor wurde die Substitutionsmethode angewendet. Bei letzterer wird davon ausgegangen, dass Strom aus nicht fossilen Quellen eine entsprechende Stromerzeugung aus fossil befeuerten Kraftwerken ersetzt. In beiden Methoden werden Umrechnungsfaktoren verwendet, die angeben, wieviel Primärenergie benötigt wird, um eine Energieeinheit Strom herzustellen.

Zur Erzeugung von 1 kWh Strom (1 kWh = 3,6 MJ) sind beim herkömmlichen fossilen Kraftwerkspark mit einem Wirkungsgrad von 38 % (globaler Durchschnitt; BP, 2008) rund 2,63 kWh Primärenergie notwendig. Dabei fallen rund 1,63 kWh Umwandlungsverluste (62 %) an. Mit Wasser-, Solar- und Windenergie wird dagegen direkt und ohne thermische Umwandlungsverluste Strom erzeugt (Wirkungsgrad 100 %). 1 kWh Windstrom entspricht daher „nur“ 1 kWh Primärenergie, ersetzt aber 2,63 kWh fossile Primärenergie. Es ist für die Bilanz von großer Bedeutung, ob und wie dieser Unterschied berücksichtigt wird. Die Wirkungsgradmethode verwendet 1 kWh als Umrechnungsfaktor für direkt erzeugten Strom aus erneuerbaren Energien, die Substitutionsmethode jedoch den substituierten Wert 2,63 kWh.

Die Wirkungsgradmethode setzt 1 kWh Strom (Endenergie) aus erneuerbaren Energien mit 1 MJ fossiler, chemischer Primärenergie oder 1 kWh thermischer Energie gleich, was den Gesetzen der Thermodynamik widerspricht und rein physikalisch falsch ist. Aus 1 kWh fossiler chemischer Energie können mit dem angenommenen Kraftwerkspark nur 0,38 kWh Strom produziert werden. Dieser Vergleich zeigt, dass die beiden Energieformen nicht gleichwertig sind und nicht gleich gewertet werden können. Bestätigt wird dies durch den VDI, der in der VDI Richtlinie 4661 schreibt, dass die Umrechnungsfaktoren für erneuerbare Energien, Kernkraft und Strom aus Abfall in der Wirkungsgradmethode „durch politische Beschlussfassung zum Teil ohne Berücksichtigung physikalisch-technischer Randbedingungen“ angesetzt wurden (VDI, 2003). Diese Stellungnahme dürfte sich auf die Nutzung der Kernkraft bezogen haben, die durch diese Methode primärenergetisch deutlich besser gestellt wird. In der Wirkungsgradmethode wird demnach der Beitrag der erneuerbaren Energien im Stromsektor systematisch falsch dargestellt: Selbst bei einer Vollversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien bliebe nach der derzeitigen Anrechnung ein fossiler Primärenergierestbedarf für die Stromproduktion von 62 %. Bisher ist diese Tatsache noch nicht offenkundig geworden, weil der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung noch vergleichsweise gering ist. Steigt dieser Anteil kontinuierlich, wird nur die Substitutionsmethode einer korrekten und unverzerrten Primärenergieberechnung gerecht.

Der WBGU setzt daher bevorzugt diese Methode ein und nimmt einen Referenzwert für die Substitution fossiler Energieträger von 2,778 $kWh_{Primärenergie}/kWh_{Strom}$ an, was einem Wirkungsgrad des globalen thermischen Kraftwerksparks von 36 % entspricht. Dieser Wert ist von dem durchschnittlichen Wirkungsgrad des thermischen OECD-Kraftwerksparks von 38 % abgeleitet, der etwas höher ist als der globale Wert und auch vom Renewable Energy Policy Network verwendet wird (REN21, 2008). Mit Hilfe des OECD-Referenzwertes wird im „BP Statistical Review of World Energy“ nach der Substitutionsmethode jährlich der globale Primärenergiebedarf ermittelt (BP, 2008).

Bei einem Ausbau der erneuerbarer Energien nach dem „Leitszenario 2006“ des BMU für Deutschland (Nitsch, 2007) werden erneuerbare Energien im Jahr 2030 nach der Substitutionsmethode 45 % des Primärenergiebedarfs zur Stromerzeugung abdecken, nach der derzeit angewandten Wirkungsgradmethode irreführenderweise jedoch nur 24 % (Sterner et al, 2008). Besonders deutlich wird dieser methodische Unterschied in der globalen Bilanz von Kernenergie und Wasserkraft. Beide Energiequellen lieferten 2005 etwa gleiche Strommengen: die Kernenergie 2.770 TWh, die Wasserkraft 2.934 TWh (IEA, 2006b; BP, 2008). In der von der IEA verwendeten Wirkungsgradmethode hat die Kern-

Abbildung 4.1-1
Anteile der Energieträger am globalen Primärenergiebedarf. a) nach der Wirkungsgradmethode im Jahr 2005, *Andere beinhaltet weitere erneuerbare Energien; Gesamtprimärenergiebedarf: 479 EJ.
b) nach der Substitutionsmethode im Jahr 2006; Gesamtprimärenergiebedarf: 509 EJ.
Quellen: BP, 2008; REN21, 2008; GWEC, 2008

energie einen Primärenergiebeitrag von 30,2 EJ (Wirkungsgrad 0,33), also den fast dreifachen Beitrag im Vergleich zu Wasserkraft mit 10,5 EJ Primärenergie (IEA, 2006b). Nach der Substitutionsmethode liegen die Beiträge von Kernenergie (26,7 EJ bzw. 5,2 %) und Wasserkraft (28,8 EJ bzw. 5,7 %) jedoch in derselben Größenordnung (BP, 2007). Die Unterschiede in der Berechnung der Primärenergie werden in den Grafiken zum Anteil der Primärenergieträger an der globalen Energieversorgung deutlich (Abb. 4.1-1).

Weltbevölkerung) in über 80 Schwellen- und Entwicklungsländern ist Biomasse in Form von Feuerholz, Holzkohle und Tierdung nach wie vor die wichtigste Energiequelle (IEA, 2006b). Die moderne Biomassenutzung in Form von Strom, Wärme und Kraftstoffbereitstellung ist im Vergleich zur traditionellen Biomassenutzung mit einem Anteil von 11,8 % gering. Die viel diskutierten Biokraftstoffe für den Verkehrssektor haben an der globalen Bioenergienutzung nur einen Anteil von 2,2 %, die Nutzung hat aber im letzten Jahrzehnt sehr stark zugenommen (GBEP, 2007; OECD, 2008). Ca. 3,8 % der Bioenergie wird weltweit in Strom gewandelt (Abb. 4.1-2).

Der größte mengenmäßige Verbraucher von Bioenergie ist China mit ca. 9 EJ pro Jahr, gefolgt von Indien (6 EJ pro Jahr), den USA (2,3 EJ pro Jahr) und Brasilien (2 EJ pro Jahr). In den großen europäischen Ländern ist der Anteil geringer und liegt in Frankreich und Deutschland bei etwa 0,45 EJ pro Jahr. Der Anteil in den großen Schwellenländern ist rückläufig, weil Biomasse zur Wärmeerzeugung immer mehr durch Erdgas und Flüssiggas ersetzt wird (GBEP, 2007). In den Industrieländern nimmt der Anteil dagegen zu, vor allem bedingt durch den verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehrsbereich, aber auch in der Stromerzeugung (Mitfeuerung von holzartiger Biomasse in Kohlekraftwerken, Biogasanlagen). Zur Bioenergie wird auch die Energiegewinnung aus Abfällen gezählt. Dazu gehört u.a. Energie aus Deponie- und Klärgas, Schwarzlauge aus der Papierindustrie, Waldrestholz, Biomüll und anderen kommunalen Abfällen.

Abbildung 4.1-2
Aufteilung der globalen Bioenergienutzung (Primärenergie, insgesamt 50,3 EJ) in Strom-, Wärme- und Kraftstoffbereitstellung.
Quellen: BP, 2008; REN21, 2008; GWEC, 2008

4.1.1.2 Nutzung von Biowärme und -strom im Energiesystem

Beitrag von Biowärme

Die Bioenergie spielt derzeit ihre wichtigste Rolle im Wärmesektor. 44 % des eingeschlagenen Holzes werden als Brennholz verwendet (FAO, 2006b). Nach FAO-Angaben hat die globale Nutzung von Brennholz in den 1990er Jahren ihr Maximum überschritten und sinkt gegenwärtig. Die globale Nutzung von Holzkohle hat sich zwischen 1975 und 2000 verdoppelt, wobei ein treibender Faktor hierfür die fortschreitende Urbanisierung ist (MA, 2005c). 89 % der globalen Bioenergienutzung entfallen auf die traditionelle Biomassenutzung, davon 71 % auf Haushalte, die insbesondere in Entwicklungsländern liegen (GBEP, 2007).

Nach dem globalen Statusreport für erneuerbare Energien (REN21, 2008) waren 2006 global etwa 235 $GW_{thermisch}$ an Biomassewärmekapazität installiert. Nach IEA-Schätzungen werden jährlich etwa 3 EJ moderne Bioenergie im Gebäude- und Industriesektor zum Heizen verwendet. Dies umfasst auch Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung und Wärme, die zum Trocknen von Land- und Forstwirtschaftsprodukten genutzt wird (IEA, 2007c). Moderne Heizungen mit Biomasse finden sich insbesondere in den Ländern, in denen große Biomasseressourcen zur Verfügung stehen, und vor allem dort, wo Fernwärmesysteme vorhanden sind.

Beitrag von Biostrom

Der Umfang der Biomassenutzung im Elektrizitätssektor ist derzeit geringer als in der Wärmeerzeugung. Weltweit waren 2006 Biomassekraftwerke mit einer Leistung von ca. 45 GW am Netz, die 0,4 % des globalen Stromverbrauchs deckten (REN21, 2008). Dies entspricht rund 21 % der Erzeugungskapazität erneuerbarer Energien (ohne Großwasserkraft). Biomassekraftwerke kommen sowohl in den Entwicklungsländern als auch in Europa und den USA zum Einsatz. Ihre globale Stromerzeugungskapazität könnte nach einer Szenarienrechnung bis 2030 auf

306 GW und bis 2050 auf 505 GW steigen (Greenpeace, 2007).

Fast alle Arten von Biomasse können über Verbrennung, Vergasung oder Vergärung zur Stromerzeugung genutzt werden. Dabei wird überwiegend in Elektrizitäts- und Heizkraftwerken die Verbrennung zur Dampferzeugung mit einem angeschlossenen konventionellen Dampf-Kraft-Prozess in Turbinen eingesetzt. Weite Verwendung findet dabei komprimierte Biomasse in Form von Holzpellets oder -briketts, die einen ähnlichen Heizwert wie Braunkohle aufweisen. Alternativ kann Biomasse auch zusammen mit einem fossilen Brennstoff (z.B. Kohle) verfeuert werden (Co-firing). Die Mitfeuerung in großen Kohlekraftwerken hat den Vorteil eines höheren Gesamtwirkungsgrades (bis zu 45 %) im Vergleich zu kleinen Biomassekraftwerken (30–35 %) (IEA, 2007b).

Biostrom wird ferner durch die Verbrennung von Biogas in Gas- und Verbrennungsmotoren erzeugt. Biogas wird dezentral durch Vergärung flüssiger und fester Biomasse hergestellt, wobei vor allem die Verwertung von Abfällen wie Tierdung große ökologische Vorteile bietet. In Europa spielen gasförmige und feste Biomassearten zur Stromerzeugung etwa gleichgewichtige Rollen: beispielsweise wurden 2006 in Deutschland 0,9 % des Strombedarfs durch Biogasanlagen gedeckt und 1,2 % mit fester Biomasse (BMU, 2007a). Eine besonders effiziente Verstromung von Biomasse aus Abfällen bietet neben Biogasanlagen die Vergasung und Gasverstromung in Gas- und Dampf-Kraftwerken.

Beitrag von Bioenergie aus der Kraft-Wärme-Kopplung

Thermische Stromerzeugungsprozesse nutzen im Idealfall auch die entstehende Abwärme. In südlichen Ländern wird die Abwärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) für Industrieprozesse wie beispielsweise zur Trocknung eingesetzt. In den nördlichen Ländern wird sie vorwiegend für Raumwärme und Warmwasserbereitstellung genutzt, direkt oder indirekt über Nah- und Fernwärmenetze. Globale Daten zur Kraft-Wärme-Kopplung sind schwierig zu erheben, weil die Anwendungen sehr vielfältig sind (Prozesswärme, Raumwärme), der Bedarf saisonal auftritt (Heizung) und in wärmeren Ländern die Kraft-Wärme-Kopplung nur selten zur Kühlungszwecken genutzt wird. 2005 wurden in Deutschland 58 PJ Biomasse zur Strom- und Wärmeerzeugung bei einem Nutzungsgrad von 86 % in der KWK eingesetzt, was einem Primärenergieanteil von 0,4 % entspricht (Nitsch, 2007).

Handel mit Bioenergieträgern im Strom- und Wärmesektor

Produktion und Nutzung von Bioenergieträgern finden nicht selten an räumlich getrennten Orten statt. Vor allem bei der modernen Bioenergie liegen häufig größere Distanzen zwischen dem Ort der Produktion und der Endnutzung. Daher werden Vorprodukte der Bioenergieproduktion wie biogene Festbrennstoffe (Rohholz, Hackholz, Pellets), die in der Konversion verwendete Rohmaterialen (Energiepflanzen, Restholz, u.a.) sowie Bioenergie als Endprodukt (Biokraftstoffe, Strom aus Bioenergie), überregional gehandelt. Charakter und Ausmaß des Handels werden durch die Verfügbarkeit von Rohmaterialen und Konversionstechnologien sowie durch internationale Preis- und Kostenstrukturen bestimmt (Schlamadinger et al., 2005).

Der nationale und internationale Handel von Bioenergie in der Endnutzung des Strom- und Wärmesektors ist an die logistische Verfügbarkeit leistungsfähiger Strom- und Fernwärmenetze geknüpft. Physikalisch-technologische Begrenzungen schränken die ökonomische Vorteilhaftigkeit des Handels derzeit ein. Über mittlere Distanzen, z.B. innerhalb Europas, kann der Handel mit Biostrom wirtschaftlich sein (Schlamadinger et al., 2005; Schütz und Bringezu, 2006). Auf der Ebene der Vorprodukte, die mit Verbrennungstechnologien im Strom- und Wärmesektor genutzt werden (Energieholz), findet jedoch ein weltweiter Handel bisher nur in begrenztem Rahmen statt. So wurden 2005 von den 1,77 Mrd. m^3 Holz, die als Brennholz genutzt wurden (bei einer globalen Holzentnahme von rund 3 Mrd. m^3) nur 3–4 Mio. m^3 oder 0,2 % international gehandelt (FAO, 2007a). Hohe Transportkosten im Verhältnis zum Warenwert verhindern häufig die Wirtschaftlichkeit von Exporten (Thrän et al., 2005).

Allerdings lassen sich bei bestimmten biogenen Festbrennstoffen, die industriell verarbeitet wurden (Hackholz, Pellets), expandierende internationale Märkte beobachten. Angetrieben durch verschiedene nationale Maßnahmen in der Klima- und Energiepolitik wächst die Nachfrage nach Pellets in Europa, Nordamerika und Asien. Auch Brasilien, Argentinien, Chile und Neuseeland planen, Infrastrukturen für die Pelletproduktion zu entwickeln. Die Entwicklung und Verbreitung moderner Pelletierungstechnologie unterstützt diesen Trend (Thrän et al., 2005; Peksa-Blanchard et al., 2007). Pellets aus der Holzproduktion dominieren bisher die Nutzung. Grundlage ist Holz aus der Kurzumtriebsproduktion, aber auch holzartige Biomasse als Rückstand aus der Forstwirtschaft (Restholz), aus der Landwirtschaft (vor allem Stroh), aus der Weiterverarbeitung (u.a. Industrierestholz und vor allem Sägespäne) sowie Altholz nach der Endnutzung (Sperrmüll, Abriss-

Abbildung 4.1-3
Globale Produktion von Ethanol für die Verwendung als Brennstoff.
Quelle: Licht zitiert in OECD, 2008

schutt) werden verwendet (IZT, 2007). Die Pelletierung anderer Reststoffe (z.B. Presskuchen aus Ölpflanzen) befindet sich noch in der Entwicklung. Der größte Teil der stofflichen Nutzung von Wäldern entfällt weltweit auf die Papier- und Zellstoffproduktion. Der dabei anfallende energiereiche Reststoff Schwarzlauge wird fast ausschließlich direkt zur Strom- und Prozesswärmeerzeugung genutzt.

Neben Feststoffen ist Biogas als Vorprodukt für die Wärmenutzung interessant. Um künftig einen überregionalen Handel zuzulassen, kann Biogas zu Biomethan aufbereitet und in bestehende Gasversorgungsnetze eingespeist werden (Bringezu et al., 2007; Thrän et al., 2007). In Deutschland hat die Bundesregierung 2007 im Integrierten Klima- und Energieprogramm (IKEP) beschlossen, den Anteil von Biomethan im Erdgasnetz von derzeit 0 % bis 2020 auf 6 % und bis 2030 auf 10 % anzuheben (BR, 2007). Diese 6 bzw. 10 Mrd. m^3 Biogas pro Jahr werden entsprechende Handelsströme nach sich ziehen.

4.1.1.3 Nutzung von Biokraftstoffen

Beitrag von Biokraftstoffen

Der Einsatz von Biomasse als Biokraftstoff im Transportsektor ist absolut gesehen immer noch niedrig, hat sich aber in den letzten Jahren aufgrund politischer Entscheidungen und konkreter staatlicher Fördermaßnahmen (Kap. 4.1.2) rasant entwickelt.

Bioethanol

Die globale Bioethanolproduktion belief sich im Jahr 2007 auf 52 Mrd. l, entsprechend 1,2 EJ (OECD, 2008), und hat sich damit seit 2000 verdreifacht (Abb. 4.1-3). Die größten Bioethanolproduzenten sind Brasilien und die USA, die zusammen fast 90 % des Marktes abdecken (Tabelle 4.1-1). Die Ausgangsstoffe für die Produktion unterscheiden sich je nach Region: Während in den USA Bioethanol vor allem aus Mais gewonnen wird, werden in Brasilien Zuckerrohr und in Europa überwiegend Zuckerrüben und Weizen genutzt. Der in den Pflanzen enthaltene Zucker wird mit Hilfe von Hefen und Enzymen zu Bioethanol und CO_2 vergoren, anschließend durch eine mehrstufige Destillation entwässert und auf einen Ethanolgehalt von 99,5 % gebracht (FNR, 2007).

Bioethanol wird über eine niederprozentige Beimischung zu Benzin in den Verkehr gebracht. Standardmäßig wird Bioethanol mit einem Anteil von 5 % (E5) oder 10 % (E10) beigemischt. Am Markt erhältlich sind auch sog. Flexible-Fuel-Fahrzeuge, die mit E85 (85 % Bioethanol, 15 % Benzin) gefahren werden können. Der Energiegehalt pro Liter

Tabelle 4.1-1
Produktion von Ethanol als Brennstoff in den Hauptproduktionsländern und weltweit (Zahlen für 2007).
Quelle: Licht zitiert nach OECD, 2008

Land / Region	Produktion	
	[Mrd. l]	Anteil [%]
Vereinigte Staaten	26,5	51,0
Brasilien	19,0	36,5
Europäische Union	2,3	4,4
China	1,8	3,5
Indien	0,4	0,8
Welt	52,0	100,0

Abbildung 4.1-4
Globale Produktion von Biodiesel.
Quelle: OECD, 2008

Ethanol entspricht allerdings nur 65 % des Energiegehalts fossilen Benzins, weshalb die produzierten Mengen nicht direkt verglichen werden können. Der Verbrauch von Bioethanol im Fahrzeug beträgt bei gleicher Fahrleistung daher rund das 1,5-fache von Benzin.

Biodiesel

Die globale Biodieselproduktion betrug 2007 10,2 Mrd. l (entsprechend 0,32 EJ). Gegenüber dem Jahr 2000 hat sie sich bis heute mehr als verzehnfacht (OECD, 2008; Abb. 4.1-4).

Biodiesel, chemisch Fettsäuremethylester (FAME), wird durch Veresterung aus Pflanzenölen hergestellt, derzeit vor allem aus Raps-, Soja- und Palmöl. Während in Europa hauptsächlich Raps angebaut und zu Biodiesel verarbeitet wird, wird fast 90 % der globalen Palmölproduktion in Malaysia und Indonesien gewonnen, das ganz überwiegend exportiert bzw. zunehmend vor Ort auch zu Biodiesel veredelt wird. Die größten Erzeugerländer von Soja waren in den Jahren 2007/2008 die USA mit 71,3 Mio. t, Brasilien mit 61 Mio. t und Argentinien mit 47 Mio. t (Toepfer International, 2007). Während der Anbau in den USA in den letzten Jahren rückläufig war, steigt er in Südamerika. Der Großteil der Sojaproduktion wird zwar nach wie vor zu Futter- und Nahrungsmitteln verarbeitet, jedoch wird Soja zunehmend auch für die Biodieselproduktion eingesetzt. Argentinien baut zudem seine Produktionskapazitäten für den Export aus. Im vergangenen Jahr wurden von insgesamt 9,5 Mio. t pflanzlicher Öle und Fette 2,1 Mio. t Sojaöl zur Biodieselproduktion verwendet (Ronneburger, 2008). Eine Analyse von Greenpeace ergab, dass in Deutschland 20 % des beigemischten Pflanzendiesels aus Sojaöl gewonnen werden (Greenpeace, 2008).

Der energetische Ertrag von Biodiesel ist im Vergleich zu Bioethanol mit 0,32 EJ im Jahr 2007 noch relativ gering. Hauptproduzent von Biodiesel ist die Europäische Union mit einem Weltmarktanteil von 60 % (OECD, 2008), insbesondere Deutschland und Frankreich (WI, 2007). Zwar hat die globale Produktion in den letzten Jahren weiter zugenommen, doch ist sie vereinzelt aufgrund aktuell erhöhter Rohstoffpreise oder Änderungen in nationalen Steuervergünstigungen rückläufig. Außerdem wurden die Kapazitäten einiger Anlagen zurückgefahren bzw. einzelne Anlagen komplett stillgelegt.

Biodiesel wird wie Bioethanol den fossilen Kraftstoffen beigemischt. Eine Beimischung von 5 % zu herkömmlichem Diesel (B5) ist in Europa bereits Standard. Neue Hochleistungsdieselmotoren können auch 100 % Biodiesel verwenden. B100 ist besonders in Deutschland seit Jahren verbreitet und an über 1.900 Tankstellen erhältlich. Biodiesel weist mit 96 % etwa denselben Energiegehalt wie herkömmlicher Diesel auf, hat aber bessere physikalische Eigenschaften als Diesel (Viskosität, Cetanzahl), weshalb ein volumenspezifischer Mengenvergleich möglich ist (IEA, 2006; FNR, 2007a).

Pflanzenöl

Pflanzenöl aus beispielsweise Raps, Soja, Sonnenblume oder Ölpalme kann auch direkt als Treibstoff im Verbrennungsmotor verwendet werden. Da die Nutzung meist mit einer Umrüstung des Motors verbunden ist, hat die direkte Verwendung von Pflanzenöl im Vergleich zu Biodiesel und -ethanol global gesehen noch keine Relevanz im Transportwesen.

Tabelle 4.1-2
Globale Produktion von Biodiesel in ausgewählten Produktionsländern und weltweit (Zahlen für 2007). Quelle: OECD, 2008

Land / Region	Produktion	
	[Mrd. Liter]	Anteil [%]
Europäische Union	6,1	59,9
Vereinigte Staaten	1,7	16,5
Brasilien	0,2	2,2
China	0,1	1,1
Indien	0,05	0,4
Malaysia	0,3	3,2
Indonesien	0,4	4,0
Welt	10,2	100,0

Tabelle 4.1-3
Globale Anbaufläche, Produktion und Nettohandel bei Getreide und Zucker. Die Handelsmengen bei Zucker beziehen sich auf verarbeiteten Rohzucker. n. v. = nicht verfügbar. Daten für das Jahr 2006.
Quelle: FAOSTAT, 2007; Handelsdaten (für 2004/05) nach Thrän et al., 2005

	Anbaufläche [Mio. ha]	Produktion [Mio. t]	Nettohandel [Mio. t]
Getreide			
Weizen	216,1	607	89,9
Mais	144	784,8	76,6
Gerste	55,5	136,2	13,8
Roggen	5,9	15,7	22,9
Triticale	3,6	12,6	n. v.
Hafer	11,3	26	n. v.
Zucker			
Zuckerrohr	20,4	1.557,7	33,2
Zuckerrübe	5,4	247,9	n. v.

Biokraftstoffe der 2. und 3. Generation
Verfahren zur Herstellung synthetischer Biokraftstoffe (2. Generation: Biomass-to-Liquid – BTL) befinden sich in der Entwicklung. Sie versprechen bessere Kraftstoffeigenschaften sowie höhere Hektarerträge und Treibhausgasreduktionspotenziale, weil im Gegensatz zur 1. Generation die ganze Pflanze genutzt werden kann. Inwieweit diese Erwartungen erfüllt werden können, ist allerdings zweifelhaft (Kap. 7.2 und 7.3). Den erwarteten Vorteilen stehen deutlich komplexere und mit höheren Investitionskosten verbundene Anlagen gegenüber. Die Verfahren basieren auf der thermochemischen Vergasung von holzartiger Biomasse und Reststoffen. Auf diesem Pfad können Kraftstoffe wie Fischer-Tropsch-Diesel, biogener Wasserstoff, Biomethan, Dimethylether, Methanol, Biokerosin oder Ethanol hergestellt werden (Sterner, 2007). Die 3. Generation der Biokraftstoffe befindet sich noch im Stadium der Grundlagenforschung. Im Wesentlichen wird an der Produktion von Wasserstoff mit Hilfe von Mikroalgen geforscht. BTL-Kraftstoffe, vor allem synthetischer Diesel, werden erst in einigen Jahren Marktreife erreichen. Bisher ist für 2008 weltweit die erste kommerzielle Anlage mit einer Dieselproduktion von 340 barrels pro Tag und für 2012 die zweite Anlage mit 4.500 barrels pro Tag geplant (Choren, 2007). Letztere Menge entspricht 0,12 % des heutigen EU-Dieselverbrauchs.

Handel mit Bioenergie für den Transportsektor (Biokraftstoffe)

Eine Analyse der Handelsströme für Biokraftstoffe kann nur grob erfolgen, weil verarbeitete Bioenergieträger bisher kaum in den offiziellen Handelsstatistiken erfasst werden. So wird unter dem Harmonized System Commodity Description and Coding System (HS) der World Customs Organization beim Handel von Bioethanol (HS 2207 10) und Biodiesel (HS 3824 90) nicht zwischen der Verwendung als Biokraftstoff und der Verwendung in anderen industriellen Verwendungen unterschieden (Zarrilli, 2006). Hinzu kommt ein Identifizierungsproblem bei den Rohmaterialen, weil Nutzpflanzen wie Mais, Zuckerrohr oder bestimmte Ölpflanzen unterschiedlich genutzt werden können (Energie, Nahrung, stoffliche Nutzung). Eine Zuordnung auf der ersten Verarbeitungsebene zur Bioenergieproduktion ist daher schwierig (Zarrilli, 2006) und setzt ein genaues Erfassungssystem voraus. Trotzdem ist diese Zuordnung notwendig, um Verschiebungen in den Landnutzungen (Kap. 4.2) abschätzen zu können, die auf die bioenergetische Nutzung zurückzuführen, aber unter Umständen unerwünscht sind.

Bioethanol
Der internationale Handel mit Ethanol hat bisher nur einen geringen Umfang. Lediglich 10 % der globalen Ethanolproduktion werden international gehandelt, einschließlich für nicht energetische Verwendungen. Brasilien stellt mehr als die Hälfte des Exportmarkts (5 Mrd. l im Jahr 2006, ohne intra-EU-Handel; OECD, 2008). Pakistan, die USA, Südafrika, Ukraine und zentralamerikanische Staaten sind weitere Exportländer, aber mit deutlich geringeren Anteilen. Zielländer der brasilianischen Exporte sind Indien, die USA, Südkorea, Japan und verschiedene europäische Staaten (WI, 2007). Die 720 Mio. l, die 2005 in die USA importiert wurden, haben dort 5 % der inländischen Nachfrage gedeckt (Zarrilli, 2006). Da Bioethanol vielfach nicht im Anbauland

Tabelle 4.1-4
Globale Anbaufläche, Produktion und Nettohandel bei ausgewählten Ölsaaten und Pflanzenölen. n. v. = nicht verfügbar. Handelsdaten für das Jahr 2006.
Quelle: FAOSTAT, 2007, 2008b; Produktionsdaten für Palmöl. Handelsdaten (für 2004/05) nach Thrän et al., 2005
* Handelsdaten Palmöl = globale Exporte 2005; Quelle: Pastowski et al., 2007

	Anbaufläche [Mio. ha]	Produktion [Mio. t]	Nettohandel [Mio. t]		
			Saat	Schrot	Öl*
Soja	93,0	216,1	57,2	45,0	9,0
Raps	27,8	49,5	5,7	2,2	1,3
Sonnenblumen	23,7	27	1,3	2,3	1,6
Ölpalme	13,3	192,5	n. v.	n. v.	26,3*
Jatropha	n. v.	n. v.			

produziert wird, ist auch der Handel mit den Rohstoffen der Ethanolproduktion interessant, zurzeit hauptsächlich Getreide und Zucker (Tab. 4.1-3).

Biodiesel
Die internationalen Exporte von Biodiesel betrugen 2007 1,3 Mrd. l und machten damit 12 % der weltweiten Produktion aus. Hauptexporteure waren Indonesien und Malaysia mit je rund 400 Mio. l, Hauptimporteur die EU mit mehr als 1,1 Mrd. l. Die USA importierten ebenfalls signifikante Mengen, waren aber Nettoexporteur durch ihre Re-Exporte in die EU (OECD, 2008). In bedeutendem Umfang werden jedoch die Rohmaterialen zur Biodieselherstellung, d.h. Öle und Fette sowie Ölpflanzen, international gehandelt. Global ist der Energiesektor allerdings nur ein Teilsegment des Handels mit Pflanzenölen. Auch wenn genaue Angaben wegen der angesprochenen Abgrenzungsproblematik kaum zu finden sind, ist davon auszugehen, dass rund 80 % der gehandelten Öle und Fette im Nahrungsmittelsektor genutzt werden (Thrän et al., 2005). Tabelle 4.1-4 ergibt einen Überblick über ausgewählte Ölsaaten für die Biodieselproduktion.

Zurzeit wird der Großteil des Handels mit pflanzlichen Ölen durch Palmöl bestimmt. Mit einem Nettohandelsvolumen von 9 Mio. t folgen Sojaöl bzw. Sonnenblumenöl mit 1,6 Mio. t. Das Nettohandelsvolumen von Rapsöl beläuft sich nur auf 1,3 Mio. t, hiervon rund 70 % aus Kanada, die vor allem in die USA und China exportiert werden (Tab. 4.1-4; Thrän et al., 2005). Der Handel mit dem Öl von *Jatropha* ist bisher vernachlässigbar. In den Industrieländern führt der Einsatz pflanzlicher Öle als Rohstoff zur Biodieselproduktion zu einer gesteigerten Nachfrage. So ist beispielsweise seit Einführung der Richtlinie 2003/30/EG zur Förderung biogener Kraftstoffe die Nachfrage nach pflanzlichen Ölen in der Europäischen Union merklich gestiegen (Thrän et al., 2005). Viele Entwicklungsländer haben ambitionierte Ausbauziele für die Pflanzenölproduktion (Kap. 4.1.2). Insgesamt wird von der OECD-FAO prognostiziert, dass die Produktion von Ölsaaten vom Durchschnitt 2004–2006 bis 2016 global um 25 % zunehmen wird. Es wird angenommen, dass südostasiatische Staaten wie Malaysia, Thailand, Indonesien und die Philippinen in naher Zukunft ihr Exportpotenzial (auch an Biodiesel) weiter entwickeln werden, ebenso wie verschiedene afrikanische und südamerikanische Länder, in denen günstige klimatische Bedingungen für den Anbau von Energiepflanzen herrschen (Tab. 4.1-5; Zarrilli, 2006; WI, 2007).

Bioenergie für den Transportsektor – Preisentwicklungen

Die Preise für Biokraftstoffe auf nationalen und internationalen Märkten werden kurzfristig von regionalen Angebots- und Nachfragebedingungen bestimmt, die wiederum deutlich von den verschiedenen Förderpolitiken (Kap. 4.1.2) beeinflusst sind. Auf lange Sicht hat sich der Preis für Biokraftstoffe bisher in die gleiche Richtung entwickelt wie der Preis von Rohöl und fossilen Energien (OECD, 2008). Allgemein steigende Energiepreise sind aber nicht notwendigerweise mit einer erhöhten Wettbewerbsfähigkeit von Biokraftstoffen verbunden. In den meisten Ländern muss die Differenz zwischen Produktionskosten und Benzin- bzw. Dieselpreis nach wie vor mit Subventionen oder anderen Fördermitteln gestützt werden, um Biokraftstoffe am Markt zu halten (Kap. 4.1.2). Haupttreiber für steigende Produktionskosten bei Biokraftstoffen war zuletzt der Preisanstieg für Energiepflanzen, die gleichzeitig auch in der Nahrungsmittelproduktion nachgefragt werden (Kap. 5.2.5.2; IMF, 2007). Diese Trends stellen sich aber je nach Region und Energiepflanzen unterschiedlich dar (Abb. 4.1-5).

Abbildung 4.1-5
Produktionskosten für ausgewählte Biokraftstoffe 2004–2007 in Hauptproduktionsländern. Die Säulen zeigen die Kostenanteile nach Einsatzfaktoren. Der Abstand zwischen Nettogesamtkosten (Raute) und Nettopreis für Benzin (Kreis) veranschaulicht die Wettbewerbsfähigkeit. Es wird deutlich, dass sich die Wettbewerbsfähigkeit dieser Biokraftstoffe trotz hoher Preise für Rohöl und fossile Kraftstoffe in den letzten Jahren nicht durchgehend verbessert hat.
Quelle: OECD, 2008

4.1.2 Aktuelle Bioenergieförderpolitik

Die zurzeit in vielen Ländern zunehmende energetische Nutzung von Biomasse ist Folge gezielter staatlicher Fördermaßnahmen, die unterschiedlichen klima-, energie- und wirtschaftspolitischen Zielsetzungen dienen (Kap. 2). Staatliche Interventionen in Biomasse- und Energiemärkten verändern die Marktpreise und setzen dadurch Anreize, Bioenergie verstärkt zu nutzen bzw. zu erzeugen. Aufgrund der vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten von Biomasse als Nahrungs-, Futtermittel und Energieträger beeinflussen sowohl Fördermaßnahmen im Energiesektor als auch in den Sektoren Land- und Forstwirtschaft die Produktion und Nutzung von Bioenergie. Daneben sind Instrumente der nationalen und internationalen Umweltpolitik für den Bioenergiesektor relevant, wie z. B. die Möglichkeit von Entwicklungsländern, Bioenergieprojekte über den Verkauf von Emissionsgutschriften im Rahmen des Clean Development Mechanism (CDM) zu finanzieren (Kap. 10.2).

Derzeit sind weltweit in mindestens 60 Ländern, darunter 23 Entwicklungsländer, Fördermaßnahmen für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien vorgesehen. In einigen Ländern gibt es außerdem Förderpolitiken speziell für Bioenergie, wobei insbesondere Maßnahmen zum Ausbau der Produktion und Nutzung von Biokraftstoffen weit verbreitet sind. In mindestens 17 Ländern gibt es bereits verpflichtende Beimischungsquoten für Biokraftstoffe (REN21, 2008; Tab. 4.1-5). Fokussiert man auf die besonders einschlägigen Bioenergiefördermaßnahmen im Energiesektor, so können verschiedene Arten von Subventionen in verschiedenen Stufen des Produktlebenszyklus unterschieden werden (Tab. 4.1-5; GBEP, 2007; SRU, 2007; REN21, 2008):

Stufe 1: Bezug und Einsatz von Rohmaterialen und anderen Produktionsfaktoren

Fördermaßnahmen auf der ersten Verarbeitungsstufe zielen darauf ab, die einheimische Produktion von Rohmaterialien als Energieträger zu begünstigen. Im Mittelpunkt steht derzeit in vielen Ländern die Förderung des Anbaus von Energiepflanzen. Instrumente sind hier typischerweise Agrarsubventionen oder Importzölle auf Agrargüter aus dem Ausland. Subventionierungen, die auf der Seite der Agrarproduzenten ansetzen, sind u. a. garantierte Mindestpreise, Output-bezogene Zahlungen, flächenbezogene Zahlungen sowie direkte Einkommenstransfers an die Produzenten. Eine solche Förderung kann ebenfalls auf Holz oder Reststoffe zielen. Seit 2004 gibt es in der EU im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) für den Anbau von Energiepflanzen eine Beihilfe von 45 € pro ha, sofern von den Produzenten ein Vertrag mit der verarbeitenden Industrie nachgewiesen werden kann (2003R1782 Art.88). Für den Anbau mehrjähriger Bioenergiepflanzen auf stillgelegten Flächen wird ebenfalls eine Beihilfe für die Anfangskosten gewährt, deren Höhe national geregelt ist (2003R1782, Art. 56 und Art.107).

Weiterhin existieren indirekte Fördermaßnahmen beim Einsatz von Hilfsstoffen im Pflanzen-

Kasten 4.1-2

Aktuelle Bioenergienutzung und -förderpolitik in den USA

Bioenergie spielt in der Politik der USA eine immer wichtigere Rolle. Dabei beschränkt sich die Bioenergieförderpolitik der USA bisher hauptsächlich auf Kraftstoffe für den Verkehr, während Wärme und Elektrizität bei der Förderung im Hintergrund stehen. Durch den Ausbau der Ethanol-Produktion wollen die USA primär ihre Abhängigkeit von Erdölimporten weiter reduzieren. Umwelt- und Klimaschutzaspekte werden ebenfalls berücksichtigt, sind jedoch nachrangig. Momentan hat Bioenergie einen Anteil von ca. 3 % am Primärenergieverbrauch der USA, wovon Biokraftstoffe etwa 25 % ausmachen. Die verbleibenden 75 % werden zur Wärme- und Elektrizitätsgewinnung genutzt und aus Holz und Holzabfällen gewonnen. Die USA rangieren damit beim Bioenergiekonsum nach China und Indien auf Platz 3 (Zarrilli, 2006; GBEP, 2008).

Die kontinuierliche Förderpolitik der letzten Jahre führte dazu, dass die USA heute der weltweit führende Ethanolproduzent sind, dicht gefolgt von Brasilien (Kap. 4.1.1). In den USA wird Ethanol hauptsächlich aus Mais gewonnen. Während im Jahr 2005 14,6 % der amerikanischen Maisproduktion zu Ethanol verarbeitet wurden, waren es im Jahr 2007 bereits mehr als 17 % (Zarrilli, 2006; GBEP, 2008). Im Jahr 2007 importierten die USA zudem aus Brasilien, Costa Rica, El Salvador und einzelnen Ländern der Caribbean Basin Initiative (CBI) zusätzlich ca. 1,6 Mrd. l Ethanol, davon etwa 714 Mio. l aus Brasilien (RFA, 2008). Die Biodiesel-Produktion findet in den USA in weitaus geringerem Umfang statt. Im Jahr 2006 wurden 1,7 Mrd. l Biodiesel – zumeist aus Sojabohnen – produziert, was nur einem Anteil von 16,5 % an der weltweiten Produktion entsprach. Damit sind die USA nach der EU der zweitgrößte Biodieselproduzent weltweit (Licht, zitiert in OECD, 2008).

Die Regierung hat für die Zukunft ambitionierte Ziele für die Biokraftstoffproduktion vorgegeben. Gemäß des im Jahr 2007 durch den Energy Independence and Security Act (EISA) erhöhten Renewable Fuel Standard sollen den fossilen Kraftstoffen im Jahr 2012 bereits 56 Mrd. l und weitere 10 Jahre später 136 Mrd. l nicht fossile Kraftstoffe verpflichtend beigemischt werden. Dies entspricht einem Anteil am gesamten Kraftstoffverbrauch von ca. 6–8 % im Jahr 2012 und etwa 13–14 % im Jahr 2022 (eigene Hochrechnung basierend auf den Projektionen von EIA, 2008). Die Gesamtvorgaben unterteilen sich in jährlich ansteigende Zielwerte für Biokraftstoffe der 1. Generation sowie ansteigende Zielwerte für Biokraftstoffe der 2. Generation („advanced biofuels“) und für Biokraftstoffe aus Zellulose („cellulosic biofuels“). Dabei sollen auch Anforderungen an das Treibhausgasreduktionspotenzial der Biokraftstoffe über den gesamten Lebenszyklus gestellt werden. So sollen Anlagen zur Erzeugung von Ethanol aus Getreide, die nach in Kraft treten des EISA den Betrieb aufnahmen, eine Reduktion der Lebenszyklustreibhausgasemissionen von mindestens 20 % im Vergleich zu den THG-Emissionen der fossilen Referenz im Basisjahr 2005 erreichen. Biokraftstoffe, die als „advanced biofuel“ bzw. „cellulosic biofuel“ einzustufen sind, sollen eine Reduktion von mindestens 50 % respektive 60 % vorweisen müssen (EIA, 2008; GBEP, 2008; EERE, 2008). Die Biodieselproduktion wird nach Schätzungen des US-Landwirtschaftsministeriums aufgrund der verschiedenen staatlichen Fördermaßnahmen (Tab. 4.1-5) bis 2010 auf jährlich 7,5 Mrd. l und bis 2015 auf 12,6 Mrd. l ansteigen. Künftig wird die Regierung vermehrt auf Biokraftstoffe der 2. Generation setzen, insbesondere auf Kraftstoffe aus Abfällen und Reststoffen (NGA, 2008; GBEP, 2008).

Bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse gibt es keine Zielvorgaben seitens der Regierung (GBEP, 2008). Dennoch werden durch Regulierungen teilweise Anreize zur Nutzung von Strom und Wärme aus Biomasse gesetzt. So haben einzelne Bundesstaaten für die Einspeisung von Strom Renewable Portfolio Standards festgesetzt (REN21, 2008). Darüber hinaus kommen Anlagen, die seit dem 1. Januar 2008 Strom aus Biomasse produzieren, in den Vorteil eines Renewable Electricity Production Tax Credit, der Strom aus Biomasse aus einem geschlossenen Kreislauf mit 1,9 US-$ct pro kWh und Strom aus einem offenem Kreislauf mit 1 US-$ct pro kWh unterstützt. Über die Renewable Energy Production Incentive wird Strom aus erneuerbaren Energien mit 1,5 US-$ct pro kWh über die ersten 10 Jahre zusätzlich vergütet. Weiterhin werden von der Regierung und Elektrizitätsunternehmen so genannte „Clean Renewable Energy Bonds“ ausgegeben, welche Projekte im Bereich der regenerativen Stromerzeugung unterstützen. Biokraftstoffe bleiben jedoch der Schwerpunkt der Bioenergieförderung in den USA. Als Herausforderung wird insbesondere die wettbewerbsfähige Erzeugung von Bioethanol aus Zellulose angesehen (GBEP, 2008).

bau wie Wasser und Energie. Spezifische Förderungen, etwa in Form von Steuervergünstigungen oder öffentlichen Finanzierungshilfen, begünstigen den Einsatz weiterer wertschöpfender Produktionsfaktoren in der Bioenergieproduktion, wie etwa Anlagen, Maschinen, Land oder Arbeitskräfte (Doornbosch und Steenblik, 2007; Steenblik, 2007).

Stufe 2: Aufbau von Infrastruktur, Forschung und Entwicklung

Auch der Aufbau von Infrastruktur zu Lagerung, Transport und Vertrieb von Bioenergieträgern, insbesondere von Biokraftstoffen, wird häufig mit staatlichen Mitteln gefördert. Teilweise stellt der Staat die erforderliche Infrastruktur selbst zur Verfügung, teilweise unterstützt er private Akteure mit Steuerbefreiungen, zinsgünstigen Krediten oder Fördergeldern beim Infrastrukturaufbau und -betrieb. Einige Entwicklungs- und Schwellenländer (z.B. Indien, Philippinen) haben außerdem staatliche Bioenergiepilotprojekte ins Leben gerufen, die zum Aufbau der Marktinfrastruktur oder zur Forschung bzw. Entwicklung von Produktionsverfahren beitragen. Erlöse aus Zertifikatsverkäufen im Rahmen des Clean Development Mechanism (CDM) können in Entwicklungsländern zur Finanzierung solcher Demonstrationsprojekte beitragen (Kap. 10.2). Weiterhin wird in vielen Ländern auch gezielt in die staatliche Forschung zu erneuerbaren Energietechnologien inves-

tiert, etwa in China, den USA und Peru, aber auch in Deutschland (Jull et al., 2007; GBEP, 2007).

Stufe 3: Produktion bis zum fertigen Endprodukt

Der Produktionsprozess von Bioenergie wird unterstützt, indem z.B. Produktionsanlagen durch staatliche Investitionszuschüsse gefördert werden oder die Produktionsbetriebe Steuervergünstigungen erhalten. Hinzu kommt, dass parallele Förderstrukturen für Güter etabliert sein können, die als Kuppelprodukte speziell bei der Produktion von Biokraftstoffen anfallen, wie z.B. Eiweißfutter, Glyzerin oder Rapsschrot, und die so einen zusätzlichen Produktionsanreiz setzen (GBEP, 2007; SRU, 2007).

Im Zentrum der Produktionsförderung stehen Maßnahmen, die eine breite Anwendung der Bioenergie im Markt fördern und die Marktnachfrage stützen bzw. garantieren und so den Produzenten als Anbietern eine gewisse Investitionssicherheit ermöglichen. Diese Funktion haben z.B. nationale Produktions- oder Nutzungsziele, allgemein für erneuerbaren Energien oder speziell für Bioenergie. Im Elektrizitätssektor werden in einigen Ländern Produktionsbetriebe bzw. Anlagenbetreiber zur Erzeugung von Bioenergie durch feste Einspeisetarife und Bioenergieprämien unterstützt und die Einspeisung in das nationale Stromnetz für eine bestimmte Zeitspanne zugesichert. Außerdem werden im Bereich der Strom- und Wärmeerzeugung teilweise Produktionsquoten für verschiedene Arten erneuerbarer Energien (Renewable Portfolio Standards) in Verbindung mit einem Zertifikatesystem (Renewable Energy Certificates) eingesetzt (GBEP, 2007).

Im Mobilitätssektor haben viele Länder verpflichtende Beimischungsquoten oder Ausbauziele für Biokraftstoffe eingeführt. Sehr hohe Ausbauziele im Biokraftstoffsektor streben beispielsweise die Vereinigten Staaten an: Sie möchten bis zum Jahr 2012 56 Mrd. l Biokraftstoffe nutzen. Bis zum Jahr 2022 sollen es 136 Mrd. l sein, was dann rund 20 % des jährlichen US-Kraftstoffverbrauchs entspräche (GBEP, 2007; Doornbosch und Steenblik, 2007; EERE, 2008; REN21, 2008; Kasten 4.1-2). Staatliche Beschaffungspolitik mit einer Pflicht zum Kauf von Fahrzeugen mit alternativer Antriebstechnik wie z.B. der Flex-Fuel-Technik und zum Betrieb des staatlichen Fuhrparks mit Biokraftstoffen stellt ebenso eine Form der Förderung dar und wird beispielsweise in den USA, Thailand und den Philippinen praktiziert (Doornbosch und Steenblik, 2007; GBEP, 2007).

Stufen 4 und 5: Transport und Vertrieb / Nutzung und Konsum

Der Transport und der Vertrieb von Elektrizität aus Bioenergie werden in einigen Ländern durch Reduktionen der Transport- und Verteilungstarife erleichtert, wie z.B. in Brasilien, Südafrika oder Indien. Die Nutzung von Elektrizität aus Bioenergie wird in Industrieländern häufig durch Subventionierungen oder Verbrauchsteuerbefreiungen bzw. -reduzierungen gefördert. Im Wärmebereich gibt es Finanzhilfen für Haushalte und Unternehmen zur Umrüstung von Wärmeanlagen auf regenerative Energiequellen. Weiter sind Biokraftstoffe in vielen Ländern ganz oder teilweise von der Verbrauchssteuer befreit. Tabelle 4.1-5 zeigt Beispiele für Bioenergiefördermaßnahmen ausgewählter Länder. Innerhalb der Länder haben einzelne Provinzen oder Bundesstaaten teilweise weitergehende Maßnahmen ergriffen, auf die jedoch nicht näher eingegangen wird.

Die nationalen Förderpolitiken für Bioenergie unterscheiden sich kaum hinsichtlich der verwendeten Instrumente: Im Stromsektor sind feste Einspeisetarife das bevorzugte Instrument. Im Kraftstoffbereich dominieren Beimischungsquoten und nationale Ausbauziele. Subventionen und Steuererleichterungen für Produktion oder Nutzung von Bioenergie gehören ebenfalls zu den häufig gewählten Strategien. Sehr hohe Steuererleichterungen für die Biokraftstoffbeimischung gewährt beispielsweise die USA mit 0,14 US-$ pro Liter beigemischtem Ethanol bis 2010 und 0,12 US-$ pro Liter beigemischtem Biodiesel bis 2008 (REN21, 2008). Hohe Einfuhrzölle auf Bioenergieträger finden sich vermehrt in Industrieländern (z.B. EU, USA). Auf diese Weise sollen Wettbewerbsnachteile einheimischer Produzenten durch höhere Produktionskosten bei Biokraftstoffen gegenüber Anbietern aus Entwicklungs- und Schwellenländern ausgeglichen werden.

Bei den Biokraftstoffen ist festzustellen, dass die Nachfrage nach Biodiesel und Bioethanol bei einem Wegfall der Förderung signifikant geringer ausfallen würde als mit Förderung. So würde beispielsweise die Biodieselnachfrage in der Europäischen Union schätzungsweise um 87 % und in den USA um 55 % reduziert. Global gesehen würde sich die Biodieselnachfrage etwa halbieren. Die Ethanolnachfrage ist dagegen weniger abhängig von Fördermitteln. Hier wäre bei Einstellung aller Fördermaßnahmen weltweit nur mit einem Nachfragerückgang von 14 % zu rechnen, da die Ethanolproduktion in Brasilien, einem der wichtigsten Produzentenländer, weitgehend ohne Förderung wettbewerbsfähig ist (OECD, 2008).

Die begrenzte privatwirtschaftliche Rentabilität der Biokraftstoffproduktion in einigen Ländern erfordert entsprechend hohe finanzielle Anreize für die Marktteilnehmer, um die Produktion und Nachfrage auszuweiten. So beliefen sich die geschätzten Ausgaben für staatliche Fördermaßnahmen für Biokraftstoffe in den USA, der EU und Kanada im Jahr

Tabelle 4.1-5
Beispiele für Bioenergieförderpolitik in ausgewählten Ländern. Stand August 2008. EE = erneuerbare Energien
Quellen: Biopact, 2006; Lindlein, 2007; REN21, 2006; Reuters, 2007; UNCTAD, 2006a; Zarrilli, 2006; GBEP, 2007; GTZ, 2007a; Steenblik, 2007; WI, 2007; Doornbosch und Steenblik, 2007; Jull et al., 2007; IEA und JREC, 2008; MME, 2008; Economist, 2008b

Land /Länder-gruppe	Motivation	Förderpolitik (gegliedert nach drei Kategorien) *(1) Allgemeine Ausbauziele für Erneuerbare Energien* *(2) Ziele/Maßnahmen im Bereich Strom&Wärme* *(3) Ziele/Maßnahmen im Bereich Mobilität (Biokraftstoffe)*
Industrieländer		
EU-27	Klimaschutz, Versorgungssicherheit, landwirtschaftliche Diversifizierung, ländliche Entwicklung	(1) EE-Ausbauziele (12 % EE ab 2010, geplant: 20 % EE-Endenergie ab 2020); Steuererleichterungen für EE (national); Flächenzahlungen für den Anbau von Energiepflanzen auf Brachflächen (45 € pro ha); Forschungsförderung: 7.Rahmenprogramm der EU (2) Ausbauziel für Strom aus EE (21 % ab 2010); feste Einspeisetarife für Bioenergie (national, z. B. in Deutschland durch EEG); Handel mit EE-Zertifikaten (national) (3) Verpflichtende Beimischungsquoten für Biokraftstoffe (5,75 % ab 2010, geplant: 10 % ab 2020); (teilweise) Steuerbefreiungen bzw. -erleichterungen für Biokraftstoffe (national); Importzölle für Biokraftstoffe (10,2 €ct bzw. 19,2 €ct für vergälltes/ unvergälltes Ethanol; 1,9 % ad valorem für Palmöl; 6,5 % ad valorem für Biodiesel).
USA	Versorgungssicherheit, Energieautonomie, ländliche Entwicklung, Umweltschutz	(1) Investitionszuschüsse für EE-Technologien; Steuervergünstigungen für EE; Bioraffinerie-Demonstrationsprojekte; Renewable Portfolio Standards in einzelnen Bundesstaaten (2) feste Einspeisetarife für Strom aus EE; Programm zur Nutzung von Waldrestholz (Woody Biomass Grants) (3) Ausbauziele für Biokraftstoffe (56 Mrd. l ab 2012 / 136 Mrd. l alternative Kraftstoffe ab 2022, entsprechend 20 % des nationalen Kraftstoffbedarfs in 2022); Importzölle auf Ethanol (2,5 % ad valorem zuzügl. 14,27 US-$ct pro l); Steuervergünstigungen für Biokraftstoffe (13,5 US-$ct pro l); Steuererleichterungen für Autos mit Brennstoff-, Hybrid- oder Flex-Fuel-Technik; günstige Finanzierungskonditionen für Landwirte und Biokraftstoffproduzenten beim Aufbau von Infrastruktur und Produktionsanlagen; Einsatz von 20 %-iger Biodieselbeimischung in öffentlichen Verkehrsmitteln und im staatlichen Fuhrpark; Steuererleichterungen für Ethanol-Tankstellen; staatliche Förderung für Biokraftstoffforschung (Bioenergy Research Centers).
Kanada	Klima- und Umweltschutz, Energiesicherheit, technologischer Fortschritt	(1) staatliche Fördermittel und Steuererleichterungen für EE; Renewable Portfolio Standards in vier Provinzen; nationale Einspeiseprämie für Strom aus EE in Höhe von 0,01 CA-$ pro kWh; staatliche Beschaffungspolitik: Deckung von 20 % des Strombedarfs der Regierung mit Strom aus EE; staatliche Zuschüsse für Anlagen zur Wärmeerzeugung aus EE (2) Fördermittel für F&E im Bereich Bioenergie (3) staatliche Fördermittel für die Entwicklung der Biokraftstoffproduktion und notwendiger Infrastruktur; verpflichtende Beimischung von 5 % Ethanol ab 2010 und 2 % Biodiesel ab 2012; nach 3 Jahren schrittweise auslaufende Produktionssubventionen für Ethanol (0,10 CA-$ pro l) und Biodiesel (0,20 CA-$ pro l); Importzoll auf Ethanol in Höhe von 0,0492 CA-$ pro l; Forschungsförderung für Biokraftstoffe der 2. Generation.
Australien	ländliche Entwicklung, Diversifizierung der Transportenergiequellen	(1) EE-Ausbauziel (geplant: 20 % EE bzw. 45.000 GWh ab 2020); staatliche Fördermittel und günstige Finanzierungskonditionen für Investitionen in EE-Technologien (2) Renewable Portfolio Standards (9,5 TWh Strom aus EE jährlich ab 2010); Handelbare EE-Zertifikate; feste Einspeisevergütungen für Strom aus EE in Südaustralien (3) Ausbauziel für Biokraftstoffe (350 Mio. l bis 2010); Importzoll auf unvergälltes Ethanol (5 % zuzüglich 0.381 AUS-$ pro l); Steuerrückzahlungen für im Inland produziertes Ethanol; Produktionssubventionen für Biokraftstoffe; Förderung der Biokraftstoffinfrastruktur durch Zuschüsse.
Japan	Reduktion der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, Klima- und Umweltschutz, landwirtschaftliche Diversifizierung	(1) Nationale Biomasse-Strategie (Biomass Nippon Strategy); (2) Ausbauziel für Strom aus EE (1,63 % ab 2014) sowie spezifische Ausbauziele ab 2010 für Strom aus Biomasse und Deponiegas (5,86 Mrd. l Rohöläquivalent) und für Wärme aus Biomasse (3.08 Mrd. l Rohöläquivalent); verpflichtende Netzeinspeisung für Strom aus Biomasse; Renewable Portfolio Standards (3) Ausbau ziel für Biokraftstoffe (50 Mio. l Eigenproduktion bis 2011; 500 Mio. l Rohöläquivalent; 6 Mrd. l pro Jahr ab 2030); Ersatz von 20 % der fossilen Brennstoffe

		ab 2030 durch alternative Brennstoffe; Importzölle auf Palmöl (3,5 % ad valorem); Steuererleichterungen für Biokraftstoffe; Bevorzugung von Tankstellen, die Biokraftstoffe anbieten.
Schwellenländer		
Brasilien	Unabhängigkeit von Ölimporten, wirtschaftliche Entwicklung durch Export von Bioenergie, ländliche Elektrifizierung, Klima- und Umweltschutz	(1) Förderprogramm PROINFA für EE; Bioenergieforschung im Rahmen des National Agroenergy Plan (2) Ausbauziele für Strom aus EE (3.300 MW aus Wind, Biomasse, Kleinwasserkraft ab 2006); feste Einspeisevergütungen für Strom aus EE sowie reduzierte Transport- und Verteilungstarife; Stromeinkauf zu Vorzugsbedingungen von EE-Anlagebetreibern; Förderung von EE für die ländliche Elektrifizierung (3) Beimischungsquoten für Biokraftstoffe (20–25 % für Ethanol, ab Juli 2008 3 % bzw. ab 2013 5 % für Biodiesel); Steuererleichterungen für Biokraftstoffe; Steuererleichterungen und Produktionssubventionen für Flex-Fuel-Fahrzeuge; Nationales Biodieselprogramm (u.a. Social-Fuel-Siegel); Importzoll auf Palmöl (11,5 % ad valorem); Nutzung von Ethanol für den staatlichen Fuhrpark.
China	Versorgungssicherheit, Klima- und Umweltschutz, ländliche Entwicklung	(1) Ausbauziele für EE (15 % EE-Primärenergie ab 2020, davon 30 GW Bioenergie); Einrichtung eines Fonds zur Forschungsförderung im Bereich EE; zinsbegünstigte Kredite für Infrastrukturaufbau; Steuererleichterungen für Produzenten und Konsumenten von Bioenergie; US-China MoU on Biomass Development (Forschungs- u. Technologiekooperation) (2) feste Einspeisevergütung für Strom aus Biomasse; Steuererleichterungen für Biogas; Förderung kleiner Biogasanlagen in ländlichen Gebieten (3) Ausbauziele für Biokraftstoffe (15 % der Transportenergie ab 2020, d.h. 13 Mrd. l Bioethanol pro Jahr und 2,3 Mrd l Biodiesel pro Jahr ab 2020, 50 Mrd. l Kraftstoffe aus fester Biomasse ab 2020); Ad valorem-Importzoll auf Ethanol (30 %); Rückvergütung der Mehrwertsteuer auf Ethanol; 10 %-Beimischungsquote für Ethanol in neun Testregionen; staatliche *Jatropha*- und Ethanol-Modellprojekte und -Demonstrationsanlagen.
Indien	Energieautonomie, Versorgungssicherheit, ländliche Elektrifizierung	1) Steuererleichterungen und zinsgünstige Kredite für EE-Anlagenbetreiber; Rabatte auf Transport und Verteilung von EE; Bioenergieprojekte im Rahmen des CDM; ((2) nationale Ausbauziele für Strom aus Bioenergie (10 % bis 2012; geplant: 15 % ab 2032); feste Einspeisetarife für Strom aus EE; Subventionierung von Biomassekraftwerken und Biogasanlagen; Förderung von kleinen Biogasanlagen für die ländliche Elektrifizierung („Remote Village Electrification Programme"); (3) nationale Beimischungsziele für Biokraftstoffe (10 % Ethanol ab 2008; 20 % Ethanol und 20 % Biodiesel ab 2017); ambitionierte Förderpolitiken werden teilweise in den einzelnen Bundesstaaten verfolgt; fester Abnahmepreis für Ethanol; staatliche *Jatropha*-Modellprojekte.
Mexiko	Energieautonomie, ländliche Energieversorgung, Klima- und Umweltschutz	(1) Steuererleichterungen bei Investitionen in EE; beschleunigte Abschreibung für EE-Projekte; (2) Ausbauziele für Strom aus EE (1 GW ab 2006; 8 % ab 2012; 4 GW ab 2014); Rabatte auf Transport und Verteilung von Strom aus EE; (3) Ausbauziele für Biokraftstoffe (Produktion von 454 Mio. l Bioethanol jährlich ab 2012; 20 % Biodiesel-Beimischung ab 2011/12); Ethanol-Beimischungspflicht von 10 % in städtischen Gebieten; Importzoll auf Ethanol (ad valorem-Zoll von 10 % zuzüglich 0,36 US-$ pro l); Biodiesel-Demonstrationsprojekte.
Südafrika	ländliche Entwicklung, Energieautonomie, Klimaschutz	(1) Ausbauziele für Erneuerbare Energien (4 % ab 2013); Subventionierung von Technologieentwicklung; (2) Ausbauziel für Strom aus EE: 10 TWh ab 2013 (3) Steuererleichterungen für Biokraftstoffe; freiwillige Beimischung von Biokraftstoffen (9 %); verpflichtende Beimischungsquoten für Biokraftstoffe (geplant: 8 % für Ethanol und 2 % für Biodiesel ab 2008), verbunden mit 50 % Steuerbefreiung für Biodiesel und 100 % Steuerbefreiung für Ethanol; staatliche Biokraftstoffpilotprojekte (u.a. *Jatropha*).
Entwicklungsländer		
Südostasien (Philippinen/ Thailand/ Indonesien/ Malaysia)	Versorgungssicherheit, ländliche Entwicklung, ländliche Elektrifizierung Deckung des Energiebedarfs	(1) EE-Nutzungsziele (Indonesien: 15 % Primärenergie aus EE ab 2025; Thailand: 8 % Primärenergie ab 2011); Steuererleichterungen für EE-Projekte (Philippinen); Bioenergieprojekte im Rahmen des CDM (Indonesien); (2) Ausbauziele für Strom aus EE (Thailand: 8 % ab 2011; Malaysia: 5 % ab 2005; Philippinen: 4,7 GW ab 2013); feste Einspeisetarife für Strom aus EE (Indonesien, Thailand); günstige Finanzierungskonditionen für Bioenergieproduzenten (Philippinen); Förderung von EE für die ländliche Elektrifizierung (Indonesien, Philippinen, Thailand) (3) Beimischungsquoten für Biokraftstoffe (Malaysia: 5 % Biodiesel ab 2008; Thailand: 10 % Ethanol ab 2007, 3 % Biodiesel ab 2011 / 10 % Biodiesel

		und Bioethanol ab 2012; Philippinen: 1 % Biodiesel und 5 % Ethanol ab 2008 / 2 % Biodiesel und 10 % Ethanol ab 2010; Indonesien: derzeit 3 % Ethanol und 2,5 % Biodiesel); Ausbauziele für Biodieselproduktion/-nutzung (Thailand: 3,1 Mrd. l Biodiesel pro Jahr ab 2012 und 1,1 Mrd. l Ethanol pro Jahr ab 2011(Produktion); Indonesien: 1,3 Mrd. l Biokraftstoffe pro Jahr ab 2010 (Produktion); 10 %/20 % des nationalen Kraftstoffverbrauchs ab 2010/25 (Nutzung, geplant)); Steuererleichterung für Biokraftstoffprojekte oder -komponenten (Philippinen, Malaysia, Thailand); Beimischungspflicht für Regierungsfuhrpark/öffentliche Verkehrsmittel (Thailand: 10 % Ethanol im Regierungsfuhrpark; Philippinen: 1 % Biodiesel im Regierungsfuhrpark; Malaysia: 5 % Biodiesel in öffentlichen Verkehrsmitteln); *Jatropha*-Pilotprojekte und Biodiesel-Pilotanlagen (Thailand).
Westafrika (u.a. Senegal, Mali, Ghana, Nigeria)	Energieautonomie, ländliche Entwicklung, landwirtschaftliche Diversifizierung	(1) Nutzungsziele für EE (Mali: 15 % Primärenergie aus EE ab 2020, Senegal: 15 % Primärenergie ab 2025) (2) Ausbauziele für Strom aus EE (Nigeria: 7 % ab 2025); (3) Ausbauziele für Biokraftstoffe (Nigeria: Produktion von bis zu 140 Mio. l jährlich, bis zu 10 % Ethanolbeimischung geplant; Senegal: Biodiesel aus *Jatropha* und Ethanol aus Zuckerrohr, mit Ziel der Biodiesel-Selbstversorgung ab 2012; Mali: dezentrale Verwendung von *Jatropha*); (staatliche) *Jatropha*-Pilotprojekte und Forschungsprojekte (Mali, Senegal, Ghana, Nigeria, Burkina Faso).
(Süd-)Ostafrika (u.a. Kenia, Tansania, Malawi, Mosambik, Simbabwe)	Ländliche Entwicklung, ländliche Elektrifizierung	(1) (2) nicht bekannt (3) Biokraftstoffbeimischungspflichten (Malawi: Ethanol-Bemischungspflicht von 10–20 % seit 1082; Mosambik: geplante Beimischung von Biodiesel und Bioethanol); Ausbauziele (Simbabwe: Produktion von bis zu 50 Mio. l Ethanol pro Jahr geplant) *Jatropha*-/Ethanol-Demonstrationsprojekte (Kenia, Malawi, Mosambik, Tansania, Simbabwe); Steuerbefreiungen auf Biokraftstoffe (Mosambik: geplant).
Südamerika (u.a. Argentinien, Bolivien, Kolumbien, Guatemala, Peru)	Ländliche Elektrifizierung; ländliche Entwicklung; Energieautonomie	(1) Staatliche Forschungsförderung zu EE (Peru) (2) Steuerbefreiung für den Verkauf von Strom aus EE (Kolumbien); staatliche Demonstrationsprojekte (Bolivien); Ausbauziele für Strom aus EE (Argentinien: 8 % Strom aus EE ab 2016; Chile: 5 % Strom aus EE ab 2010); Prämienzahlungen auf EE, Steuererleichterungen bei Investitionen in Bioenergie (Argentinien, Guatemala); feste Einspeisetarife für Strom aus EE (Argentinien); Förderung von EE für die ländliche Elektrifizierung (Argentinien, Bolivien, Guatemala) (3) Biokraftstoffbeimischungspflichten (Kolumbien: 10 % Ethanol in Städten > 500.000 Einwohner, ab 2008 5 % Biodiesel; Bolivien: 2,5 % Biodiesel und 10 % Ethanol ab 2007, 20 % Biodiesel ab 2015; Peru: 7,8 % Ethanol und 5 % Biodiesel ab 2010, Argentinien: 5 % Ethanol und 5 % Biodiesel ab 2010; Guatemala: bis zu 20 % Ethanol); Steuerbefreiung für die Rohstoff- bzw. Biokraftstoffproduktion und -komponenten (Kolumbien, Argentinien, Bolivien); Betrieb des staatlichen Fuhrparks und öffentlicher Verkehrsmittel mit Biokraftstoffen (Argentinien).

2006 insgesamt auf rund 11 Mrd. US-$. Bei einer Fortschreibung der Förderpolitik könnten diese Kosten in den nächsten 5–10 Jahren auf 27 Mrd. US-$ pro Jahr ansteigen (Steenblik et al., 2007; OECD, 2008). Da staatliche Fördermaßnahmen für Biokraftstoffe nicht nur in diesen Ländern zunehmend finanziellen Druck auf die Staatskassen ausüben, kann aktuell eine Trendwende weg von der aktiven, fiskalischen Förderpolitik hin zur Förderung durch Verwendungsziele, d.h. durch Beimischungsquoten für Biokraftstoffe, beobachtet werden (GBEP, 2008). Dadurch werden für Unternehmen, die Biokraftstoffe oder dafür verwendete Rohstoffe produzieren, garantierte Absatzmärkte geschaffen. Gleichzeitig werden die Kosten der Förderung, d.h. die Mehrkosten in der Produktion, auf die Verbraucher abgewälzt. Produktions- und Verwendungsziele kommen in den OECD-Ländern und in den großen Schwellenländern Brasilien und Indien sowie zunehmend auch in Entwicklungsländern wie den Philippinen und Indonesien zur Anwendung (Steenblik et al., 2007; GBEP, 2008).

Dabei werden in einigen Entwicklungs- und Schwellenländern nationale Beimischungsquoten vermehrt in Frage gestellt, da sie Markteffekte anstoßen, die letztlich die nationale Ernährungssicherung gefährden können (Kap. 5.2). Einzelne Länder haben deshalb Regelungen erlassen, wonach bestimmte Rohstoffe von der Biokraftstoffproduktion bzw. -förderung ausgeschlossen werden. Beispielsweise ist in Südafrika Mais aus der Ethanolförderung ausgenommen und in China darf kein Getreide zur Herstellung von Treibstoffen verwendet werden (Kasten 5.2-2; Reuters, 2007; Weyerhaeuser et al., 2007).

Auch das von der EU geplante 10 %-Beimischungsziel für Biokraftstoffe gerät derzeit unter Druck, da es hohe gesamtwirtschaftliche Kosten verursacht, während das mit der Bioenergieför-

Kasten 4.1-3

Aktuelle Bioenergiepolitik und -nutzung in der EU

Mit dem Entwurf für eine EU-Richtlinie zur Förderung von Erneuerbaren Energien legte die Europäische Kommission Anfang des Jahres 2008 einen Richtlinienentwurf zur Umsetzung der Anfang 2007 von Kommission und Rat festgelegten Ziele und Strategien zum Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien vor. Danach ist bis zum Jahr 2020 ein Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Energieverbrauch in Höhe von 20 % sowie ein Anteil von Biokraftstoffen am EU-weiten Kraftstoffverbrauch in Höhe von 10 % vorgesehen. In erster Linie möchte die EU damit einen Beitrag zum Klimaschutz leisten (EU-Kommission, 2008a).

Derzeit beträgt der Anteil von Bioenergie am Primärenergieverbrauch in der EU ca. 4 % (EEA, 2007b). Biokraftstoffe machen etwa 1 % des gesamten Kraftstoffverbrauchs aus (REN21, 2008; EU-Kommission, 2006a). Die EU-interne Biokraftstoffproduktion wird in vielen Mitgliedstaaten durch Steuererleichterungen gefördert. Insgesamt produzierte die EU im Jahr 2007 6,1 Mrd. l Biodiesel, was 59,9 % der weltweiten Biodieselproduktion entsprach. Innerhalb der EU zählten Deutschland, Frankreich, Italien, Tschechien und Spanien zu den wichtigsten Produzentenländern (Licht, zit. in OECD, 2008). Ethanol wird in der EU in deutlich kleinerem Umfang produziert, hauptsächlich aus Getreide und Zuckerrüben. Hauptproduzentenländer in der EU sind Deutschland und Spanien. Mit einer Menge von 2,3 Mrd. l kam die gesamte EU im Jahr 2007 auf einen Anteil von 4,4 % an der Weltethanolproduktion (Zarrilli, 2006; Licht zitiert in OECD, 2008; REN21, 2008).

Für einen weiteren Ausbau des Biokraftstoffanteils gemäß der im Richtlinienentwurf geforderten Quote von 10 % ist die EU, insbesondere bei Ethanol, auf Importe angewiesen (REN21, 2008). Wichtigste Importländer für Ethanol sind Brasilien und Pakistan. Palmöl für die Biodieselproduktion wird überwiegend aus Malaysia importiert (Zarrilli, 2006). Allerdings mehren sich derzeit Zweifel an der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit einer 10 %-Beimischungsquote für Biokraftstoffe. Während das Erreichen der mit der Beimischung verfolgten Ziele, wie Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Schaffung von Arbeitsplätzen, ungewiss ist, werden die geschätzten Kosten für staatliche Fördermaßnahmen mit hoher Wahrscheinlichkeit die erhofften Nutzen übersteigen (de Santi, 2008). Der Industrieausschuss des Europäischen Parlaments stellte deshalb eine Modifikation der 10 %-Quote zur Diskussion. Demnach sollten mindestens 40 % der Quote mit der Nutzung von Biokraftstoffen der 2. Generation, Wasserstoff oder Elektromobilität erreicht werden (EU- Parlament, 2008). Eine endgültige Festlegung der Quote wird bis Ende 2008 erwartet.

Die Stromproduktion aus Biomasse ist ein weiterer wichtiger Pfeiler des 20 %-Ziels der EU. Als Fördermaßnahmen werden in den einzelnen Mitgliedstaaten u.a. Einspeisetarife, Renewable Energy Certificates (RECs), steuerliche Anreize oder Subventionen für Produktionskapital angewendet, wobei sich Einspeisetarife und RECs bisher als die wirkungsvollsten Instrumente erwiesen. 21 Mitgliedstaaten nehmen an einem intereuropäischen Transfersystem für RECs teil, dem „European Energy Certificate System“ (EECS) (REN21, 2008; EU-Kommission, 2005b). Für die Wärmeproduktion aus Biomasse gibt es im Vergleich zu Elektrizität und Kraftstoffen bisher noch keine konkreten Zielvorgaben. U.a. soll künftig die Energieeffizienz von Gebäuden verbessert und Fernwärmeanlagen gefördert werden (EU-Kommission, 2005a). Zudem soll das Potenzial hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung in den Mitgliedstaaten besser ausgeschöpft werden (GBEP, 2008).

derung vorrangig verfolgte Politikziel, einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, unter Umständen nicht erreicht werden kann. So schätzt das Londoner Beratungsunternehmen Europe Economics, dass die Erreichung des 10 %-Ziels der EU für Biokraftstoffe jährliche gesamtwirtschaftliche Transferzahlungen in den Biokraftstoffsektor in Höhe von 11–23 Mrd. € erfordert (Europe Economics, 2008). Verschiedene Studien, u.a. des Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission und der OECD, kommen gleichzeitig zu dem Ergebnis, dass die Erfüllung des 10 %-Beimischungsziels mit großer Wahrscheinlichkeit nicht zu einer signifikanten Verringerung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor beitragen wird. In Bezug auf den Klimaschutz und die Kosten pro Tonne vermiedener Treibhausgasemissionen haben Biokraftstoffe bisher in der Regel unterdurchschnittliche Resultate gezeigt: Mit Vermeidungskosten von z.T. deutlich über 100 € pro Tonne ist die Verwendung von Biokraftstoffen wesentlich teurer als alternative Vermeidungsoptionen (Doornbosch und Steenblik, 2007; de Santi, 2008; OECD, 2008; Kap. 7.3; Kasten 4.1-3). Auch bezüglich der Politikziele Erhöhung der Energiesicherheit sowie Förderung der ländlichen Entwicklung wird vom JRC kein wesentlicher Nutzen aus der Biokraftstoffpolitik der EU festgestellt. Vielmehr errechnet das JRC, dass durch die Biokraftstoffförderung für die EU-25 zwischen 2007 und 2020 mit hoher Wahrscheinlichkeit (80 %) gesamtwirtschaftlich Nettokosten verursacht werden. Die Berechnungen gehen von 33–65 Mrd. € gemessen in Gegenwartswerten aus (de Santi, 2008). Einige Entwicklungsländer, vor allem in Afrika und Südamerika, besitzen zwar ein hohes Potenzial zur Biomasseproduktion für energetische Zwecke, haben jedoch teilweise noch keine entsprechenden Politikziele formuliert. Falls Ziele formuliert wurden, wurde noch keine konkrete Förderpolitik umgesetzt, wie z.B. in Chile, El Salvador und Panama (Jull et al., 2007). Die notwendigen Investitionen in Infrastruktur und Technologie stellen eine Hürde für diese Länder beim Aufbau eines Bioenergiemarktes dar. Auch der Export ist aufgrund der Subventions- und Handelspolitik vieler Industrieländer für Entwicklungsländer erschwert. Handelsbarrieren ergeben sich für Entwicklungsländer außerdem

aus den international nicht harmonisierten technischen Standards (Mathews, 2007; Jull et al., 2007; von Braun, 2007; Lindlein, 2007). Aus diesen Gründen ist für viele Entwicklungsländer in Afrika, Lateinamerika und Asien die kleinskalige Bioenergieproduktion für den Eigenbedarf eine bevorzugte Option (Kap. 10.8).

4.2 Globale Landbedeckung und Landnutzung

Zu den wichtigsten Einflussnahmen des Menschen auf die Umwelt zählen Änderungen sowohl in der Landbedeckung, die sich auf Veränderungen der biophysikalischen Merkmale der Erdoberfläche beziehen, als auch in der Landnutzung, die durch den Zweck der menschlichen Nutzung bestimmt ist (Turner et al., 1990; Lambin et al., 2001). Heute sind bereits über drei Viertel der eisfreien Landfläche durch menschliche Nutzung verändert worden (Ellis und Ramankutty, 2008). Leider wird das allgemeine Verständnis über die Ursachen von Landbedeckungs- und Landnutzungsänderungen häufig von falschen Vereinfachungen dominiert. Weder Bevölkerungszuwachs noch Armut gelten als die alleinigen Ursachen globaler Landbedeckungsänderungen, die vor allem die Umwandlung von Waldflächen in Kulturland betreffen (Lambin et al., 2001). Diese Veränderungen werden vor allem durch die Reaktionen der Menschen auf ökonomische Möglichkeiten verursacht, welche wiederum eng an soziale, politische und infrastrukturelle Rahmenbedingungen geknüpft sind (Kap. 5). Die Auswirkungen der Landbedeckungs- und Landnutzungsänderungen (Kap. 4.2.1 und 4.2.2) beeinflussen ihrerseits die Kohlenstoffspeicherkapazität, die Treibhausgasemissionen und die Fruchtbarkeit der Böden (Kap. 4.2.3), aber auch das lokale Klima und damit wiederum die lokale Landbedeckung.

4.2.1 Die globale Landbedeckung

Zur Landbedeckung zählen neben topographischen Merkmalen der Landoberfläche auch anthropogene Strukturen wie Gebäude oder Fahrbahnen, aber auch Aspekte der natürlichen Umwelt, etwa Bodentyp, Vegetationstyp, Biodiversität, Oberflächen- und Grundwasser (Meyer, 1995). Bei Fragen zur Landnutzung wird meist auf land- und forstwirtschaftliche Nutzungen fokussiert (Intensität, Ausprägung), auch wenn Siedlungs- und Wassernutzungen ebenfalls hier anzusiedeln sind.

Direkte und unmittelbare Effekte anthropogen bedingter Landbedeckungs- und Landnutzungsänderungen auf den Lebensraum (Umwandlung, Verlust, Fragmentierung, Eutrophierung) führen zu Veränderungen in der Hydrologie, dem Nährstoffkreislauf, dem Wärmehaushalt und häufig auch zu vermehrter Erosion der umgewandelten Oberfläche. Diese Effekte müssen auch bei der Diskussion um Bioenergienutzung berücksichtigt werden. Indirekte Effekte manifestieren sich hingegen auf der Ökosystemebene häufig als Verlust biologischer Vielfalt (Jarnagin, 2004).

Datengrundlage

Als wichtigste Informationsquelle zur Beschreibung von Landbedeckung und Landbedeckungsänderungen, sowohl auf regionaler wie auch auf globaler Skala, dienen Fernerkundungsdaten (DeFries und Townsend, 1999; Abb. 4.2-1). Die Klassifizierung der Landbedeckung variiert jedoch je nach Datenquelle sehr stark, da parallel unterschiedliche Definitionen für die jeweiligen Klassen benutzt werden. So werden gemäß Lepers et al. (2005) weltweit etwa 90 verschiedene Definitionen für „Wald“ verwendet. Die FAO (1997) definiert „Wald“ als eine Vegetationseinheit mit einem Kronenschluss von ≥10 %, einer Fläche von ≥ 0,5 ha und einer Wuchshöhe von >5 m. Das International Geosphere Biosphere Programme (IGBP) hingegen definiert „Wald“ als mehrheitlich holzige Vegetation (<60 %) mit einer Wuchshöhe von >2 m.

Ähnliche Probleme treten beim Weideland auf. In manchen Fällen stimmen die nationalen Daten nicht mit den Daten der statistischen Datenbank der FAO (FAOSTAT) überein. So ist z.B. die von Ramankutty et al. (2008) angegebene globale Fläche für Weideland von 28,0 Mio. km² um 18 % kleiner als die Abschätzung der FAOSTAT mit 34,4 Mio. km². Die größten Unterschiede waren in Saudi-Arabien, Australien, China und der Mongolei zu finden und sind in den unterschiedlichen Definitionen von „Weideland“ begründet – ein Problem, welches auch von der FAOSTAT angesprochen wird. Neben unterschiedlichen Definitionen von Acker- und Weideland stellt auch die multifunktionale Nutzung der Flächen ein Problem dar: So werden vor allem in Afrika und Asien die Ackerflächen nach der Ernte für Beweidung genutzt (Abb. 4.2-4). Weitere Probleme liegen zum einen in der Verschneidung mehrerer Fernerkundungsdatensätze. Sie können keine Auskunft über die Landnutzung „unter“ der obersten, vom Fernerkundungssensor erkannten Vegetationsdecke geben. Zum anderen unterscheidet sich teilweise die zeitliche Auflösung von Inventurdaten, die z.B. in den meisten Industriestaaten alle 5–10 Jahre erfolgt. Auch die räumliche Auflösung ist unterschiedlich hoch. Der afrikanische Kontinent und die ehemalige

Abbildung 4.2-1
Globale Verteilung der Landbedeckung, gestützt auf MODIS Satellitendaten (1 km Auflösung) des IGBP. Ackerland (2 %) bezieht sich auf ein Mosaik von Ackerland und natürliche Vegetation.
Quelle: Scanlon et al., 2007

Sowjetunion werden in den Datensätzen daher meist unterrepräsentiert.

Ellis und Ramankutty (2008) gehen trotzdem noch einen Schritt weiter und berücksichtigen neben der Landbedeckung und der Populationsdichte auch die weitere Landnutzung. Diese neue Klassifikation (Abb. 4.2-2) wäre wohl für integrative Modellierungsansätze sehr günstig, weil Ökosysteme durch eine Vielzahl anthropogen bedingter Faktoren betroffen sind, z.B. Klimawandel, Stickstoffdeposition, Verschmutzung und vor allem Landnutzungsänderungen. Aber die Treiber und die Auswirkung ihrer synergistischen Effekte zu erfassen und in gängige Klima- und Ökosystemmodelle zu integrieren, stellt eine Herausforderung dar (Fischlin et al., 2007). Außerdem ist diese neue Klassifikation noch zu jung, um ihre Anwendbarkeit auf die Aufgabenstellung bewerten zu können.

Status quo und Trends

Die größten Änderungen in der Landbedeckung erfolgten in der Vergangenheit durch Umwandlung von Wäldern und Grasland in Ackerflächen und Weiden. In den letzten 300 Jahren nahmen Acker- und Weideland um 460 % bzw. 560 % zu (Klein Goldewijk, 2001). Nur 19 % der Landfläche mit Kultivierungspotenzial liegen auch heute noch in Waldökosystemen (Fischer et al., 2002). Davon liegen die größten für Anbau geeigneten Flächen in Süd- und Nordamerika, gefolgt von Zentralamerika und Afrika.

Während der letzten vier Jahrzehnte wuchs die landwirtschaftlich genutzte Fläche um nahezu 500 Mio. ha. Dieser Trend wird wohl auch in Zukunft anhalten (Fedoroff und Cohen, 1999; Huang et al., 2002; Trewavas, 2002; Green et al., 2005). Rosegrant et al. (2001) prognostizieren die Umwandlung weiterer 500 Mio. ha in Kulturland bis 2020, vor allem in Lateinamerika und Afrika südlich der Sahara. Die FAO prognostiziert, dass bis zum Jahr 2030 die weltweiten Flächen zur Nahrungsmittelproduktion um 120 Mio. Hektar ausgeweitet werden müssen, um die Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung sicherzustellen (FAO, 2003a).

Basierend auf Fernerkundungsdaten, Expertenmeinungen, Flächenbestandserhebungen und Statistiken über Landbedeckung und Landnutzung auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene fassten Lepers et al. (2005) Landbedeckungsänderungen des Zeitraums 1981–2000 zusammen. Schwierigkeiten bei der Synthese bestehender Datensätze über Landbedeckungsänderungen waren fehlende Standarddefinitionen, unterschiedliche räumliche Auflösungen verschiedener Fernerkundungsdaten und die unterschiedliche zeitliche und räumliche Abdeckung der Datenerhebung. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die größten Flächen rascher Landbedeckungsänderungen in Asien zu finden waren.

Abbildung 4.2-2
Konzeptuelles Modell von Lebensräumen mit unterschiedlichem anthropogenem Einfluss. Von links nach rechts: Zunahme des anthropogenen Einflusses. (a) Lebensräume, die durch Bevölkerungsdichte (logarithmische Skala) und Landnutzung (Prozentskala) strukturiert sind. Sie formieren innerhalb dieser Lebensräume Muster von (b) Ökosystemstrukturen (Landbedeckung), Prozessen (Nettoprimärproduktion, Kohlenstoffemissionen, Verfügbarkeit reaktiven Stickstoffs) sowie Biodiversität (heimische versus eingeführte und domestizierte Biodiversität; angegeben in Beziehung zur ursprünglichen Biodiversität; weiße Flächen stehen für die Nettoreduktion der Biodiversität).
Quelle: Ellis und Ramankutty, 2008

In Südostasien kam es zwischen 1981–2000 zu einem rapiden Anstieg der Landwirtschaftsfläche, oft assoziiert mit großflächiger Rodung. Das Amazonasbecken blieb ein Hotspot tropischer Rodung. In Sibirien nahm die Walddegradation, die mit nicht nachhaltiger Nutzung und einem Anstieg der Feuerfrequenz verbunden ist, rasch zu. Eine Abnahme der landwirtschaftlich genutzten Fläche verzeichneten dagegen der Südosten der USA und der Osten Chinas. Zudem waren viele der am dichtesten bevölkerten und am schnellsten wachsenden Städte in den Tropen zu finden.

Um zeitabhängige Veränderungen in der Landbedeckung (vor allem in der Vegetationsverteilung) zu simulieren und somit Veränderungen in Ökosystemfunktionen und -leistungen abzuschätzen, werden dynamische Vegetationsmodelle (DGVMs) verwendet (Fischlin et al., 2007). Diese Option wird auch in der Modellierung von Beringer und Lucht (2008) in Kapitel 6 genutzt. Das Verschneiden von DGVMs mit Klimamodellen, hat in letzter Zeit große Fortschritte gemacht und ermöglicht es, Rückkopplungseffekte zwischen Biosphäre und Prozessen der Atmosphäre zu erforschen (Fischlin et al., 2007).

Durch die Landbedeckungs- und Landnutzungsänderungen der temperaten Zone in den vergangenen Jahrhunderten veränderte sich aber nicht nur die Vegetationsbedeckung, sondern auch die Albedo, deren Anstieg wohl einen Kühleffekt mit sich brachte (Govindasamy et al., 2001; Bounoua et al., 2002). Rückkopplungseffekte von Landnutzungsänderungen auf das Klima werden durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener lokaler Faktoren (Verdunstungsrate, Speicherkapazität des Bodenwassers, Albedo) beeinflusst, sind aber auch von großräumigen Luftzirkulationen abhängig und können sich deshalb regional unterschiedlich auswirken. Anthropogen induzierte, historische Landbedeckungsänderungen dürften die Temperaturen in landwirtschaftlich genutzten Gebieten der mittleren Brei-

Kasten 4.2-1

Begriffsdefinition „marginale Flächen"

Im Zusammenhang mit der Diskussion um die Potenziale der Bioenergie werden zunehmend land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen als mögliche Anbaustandorte in Betracht gezogen, deren Erträge vergleichsweise niedrig sind. Dabei werden die Begriffe „marginale Flächen", „degradierte Flächen", „unproduktive Flächen", „stillgelegte Flächen", „Ödland" und „Brachland" oft parallel, teilweise sogar synonym verwendet, jedoch meist ohne weitere Differenzierung. Für das vorliegende Gutachten nutzt der WBGU den Begriff „marginale Flächen" bzw. „marginal lands" als Oberbegriff für (1) Flächen mit geringer Kapazität an Produktions- und Regelungsfunktionen, aber auch für (2) Flächen, die Produktions- und Regelungsfunktionen in zum Teil erheblichem Maße eingebüßt haben. Unter (1) fallen Flächen, deren Produktivität für die Land- und Forstwirtschaft eher gering eingeschätzt wird. Dazu gehören aride und semiaride Grasländer, Wüstenrandgebiete sowie Flächen mit steilen, strukturschwachen oder erosionsanfälligen Böden, insbesondere in Gebirgsregionen. Unter (2) fallen auch ehemals produktive Standorte, die entweder aufgrund menschlich bedingter Bodendegradation ihr Ertragspotenzial verloren haben (z.B. übernutzte, degradierte, und daher unproduktive Flächen; sowohl Wald- wie auch Acker- und Graslandflächen) oder aber stillgelegte Flächen (z.B. in Mitteleuropa aus ökonomischen oder politischen Gründen bewusst aus der Produktion herausgenommene Flächen). Marginale Standorte sind generell stark anfällig für Bodendegradation.

Den Begriff „Ödland" verwendet der WBGU aufgrund der Assoziation mit – aus unbekannten Gründen – verlassenen, aufgelassenen Flächen bewusst nicht. Der Begriff „Brachland" bezeichnet im engeren Sinne ein unbestelltes Feld im Rotationsfeldbau (Acker, Wiese/Weide, Brache), das bei einer Bewirtschaftung ohne Mineraldüngung für die Erholung des Bodens notwendig ist. Inzwischen gelten auch stillgelegte Flächen als Brache, die Spuren menschlicher Nutzung aufweisen. Auch diesen Begriff benutzt der WBGU im Gutachten bewusst nicht, da die Hintergründe der Nichtnutzung unklar bleiben und daher der Begriff nur unscharf definiert ist.

ten um 1–2°C gesenkt haben (Feddema et al., 2005). Hingegen prognostizieren Simulationen der zukünftigen anthropogenen Einflüsse auf die Landbedeckung unter Berücksichtigung der weiteren Entwaldung der Tropen eine weitere Erwärmung um 1–2°C (Feddema et al., 2005). Je nach Einbezug zukünftiger Landbedeckungsänderungen in zwei IPCC-SRES-Szenarien (A2 = Regionalisierte Wirtschaftsentwicklung und B1 = Globale Nachhaltigkeit; Nakicenovic und Swart, 2000) ändern sich die Ergebnisse aus der Klimasimulation für das Jahr 2100 aufgrund der Rückkopplung der Landoberfläche mit dem Energiehaushalt der Atmosphäre signifikant (Feddema et al., 2005). So führte z.B. die Umwandlung des Regenwalds zu Ackerfläche im Amazonasgebiet im Szenario A2 für das Jahr 2100 zu einer Temperaturerhöhung von über 2°C, was wiederum Einfluss auf die Hadley- und Monsun-Zirkulation hätte.

Andere modellbasierte Studien weisen auf zukünftige Landbedeckungsänderungen vor allem in den Tropen und Subtropen hin (DeFries et al, 2002; Voldoire, 2006). Die Abschätzung der zukünftigen Landbedeckung und die Darstellung einer zukünftigen Vegetationsverteilung sind allerdings überaus schwierig, obwohl sozioökonomische Faktoren in diesen Modellen sogar noch vernachlässigt werden (DeFries et al., 2002). Die Integration von Landnutzungsdynamiken in dynamische Vegetationsmodelle findet erst neuerdings statt (Voldoire et al., 2007) und stellt einen großen Fortschritt dar. Landnutzungsänderungen haben zweifellos einen großen Einfluss auf das zukünftige regionale und globale Klima (Feddema et al., 2005; s. auch Pitman et al., 1999; Pielke et al., 2002; Voldoire et al., 2007) und können in Abhängigkeit der geografischen Lage den resultierenden Klimawandel verstärken oder abschwächen (DeFries et al., 2002; Feddema, 2005; Voldoire, 2006).

4.2.2 Die globale Landnutzung

Unter Landnutzung, die eng mit der Landbedeckung verknüpft ist, wird die Art und Weise und der Zweck der anthropogenen Landnutzung bzw. der Nutzung vorhandener Ressourcen verstanden, z.B. Ackerbau, Bergbau oder Forstnutzung (Meyer, 1995). Unter Landnutzungsänderungen (Abb. 4.2-3) versteht man sowohl das menschlich bedingte Ersetzen eines Landnutzungstyps durch einen anderen, z.B. die Umwandlung von Wald in Kulturland, als auch Änderungen der Managementpraktiken innerhalb eines Landnutzungsstyps, z.B. die Intensivierung von Landwirtschaftspraktiken. Landnutzungsänderungen und der damit verbundene Verlust und die Fragmentierung von Habitaten sind bedeutende Treiber von vergangenen und zukünftigen Ökosystemveränderungen sowie des Verlusts biologischer Vielfalt. Studien über die Auswirkungen von Klimawandel, welche Landnutzungsänderungen nicht berücksichtigen, können demzufolge zu mangelhaften Abschätzungen von Ökosystemantworten kommen (Fischlin et al., 2007).

Besonders landwirtschaftliche Aktivitäten sind für Landnutzungsänderungen verantwortlich. Laut FAO wurden im Jahr 2005 global insgesamt 49,7 Mio. km² landwirtschaftlich genutzt (FAOSTAT, 2006), davon 69 % oder 34,1 Mio. km² als Weideland und

Abbildung 4.2-3
Geschätzte Veränderungen der Landnutzung zwischen 1700 und 1995.
Quelle: Klein Goldewijk und Battjes, 1997, zitiert in Lambin et al., 2001

31 % oder 15,6 Mio. km² als Acker- und Dauerkulturland (Abb. 4.2-4). Eine neue Arbeit von Ramankutty et al. (2008) mit einer Auflösung von 10 km, die nationale und subnationale Statistiken mit Datenbeständen zur landwirtschaftlichen Flächennutzung und Fernerkundungsdaten zur Landbedeckung kombiniert, nennt für das Jahr 2000 Ackerflächen mit 15 Mio. km² sowie Weideland mit 28 Mio. km². Nach diesen Angaben nutzt der Mensch somit etwa 34 % der globalen, eisfreien Landfläche für landwirtschaftliche Zwecke.

Ramankutty et al. (2008) untersuchten ebenso, inwieweit die potenziell natürliche Vegetation durch die landwirtschaftliche Nutzung beeinflusst wurde. Verschneidet man die aktuellen Karten zur Verteilung von Landwirtschaftsflächen mit den von Ramankutty und Foley (1999) entwickelten Karten der potenziell natürlichen Vegetation, lautet das Resultat, dass etwa 30 % der temperaten, laubwerfenden Wälder zu Ackerfläche und 50 % der Grasländer zu Weiden umgewandelt wurden. Leider ist eine Aussage zu Veränderungen in diesem Zeitraum durch Vergleich dieser Studien nicht möglich, obwohl Ramankutty und Foley (1999) schon für das Jahr 1992 die globale Verteilung von Ackerflächen analysierten, da sich Methodik und Quellen änderten.

Die größten Auswirkungen veränderter Landnutzung werden in der Nettoprimärproduktion (NPP) von Pflanzen beobachtet, d.h., in der Produktion von Biomasse durch Primärproduzenten unter Berücksichtigung der Zellatmung. Monfreda et al. (2008) modellierten die weltweite NPP von Ackerflächen für das Jahr 2000. Die Regionen mit der grössten NPP von über 1 kg C pro m² und Jahr waren Westeuropa, Ostasien, die mittleren USA, Brasilien und Argentinien. Ungefähr 13 % der weltweiten Anbauflächen sind mit mehrjähriger Vegetation bepflanzt, die mehr Kohlenstoff in den Wurzeln speichern als einjährige, und auf ca. 24 % der angebauten Landwirtschaftsflächen werden Pflanzen mit dem effizienteren C4-Photosynthesemechanismus angebaut (z.B. Mais, Sorghum, Hirse und Zuckerrohr; Monfreda et al., 2008). Bei einer weltweiten NPP von 56,8 Gt C

Abbildung 4.2-4
Aktuelle globale Ausbreitung von Acker- und Weideflächen. Die Farben zeigen das Verhältnis von Acker- zu Weideland pro Fläche.
Quelle: UNEP, 2007a

pro Jahr beansprucht der Mensch, der gerade einmal 0,5 % der Biomasse heterotropher Organismen ausmacht, schon 15,6 Gt C oder fast 24 % der globalen NPP (Haberl et al., 2007). Von dieser vom Menschen genutzten Biomasse (auch HANPP: Human Appropriation of Terrestrial Net Primary Production; Imhoff et al., 2004) werden 58 % als Futtermittel und nur 12 % als direkte Nahrung genutzt. Weitere 20 % dienen als Rohstoffe und 10 % als Brennholz (Krausmann et al., 2007).

Aber auch der Wasserverbrauch in der Landwirtschaft ist durch Landnutzungsänderungen stark verändert und liegt heute bereits höher als in allen anderen Wirtschaftssektoren (MA, 2005b). So werden in Niedriglohnländern 87 % des entnommenen Wassers für landwirtschaftliche Zwecke genutzt, in Ländern mittleren Lohnniveaus 74 % und in Ländern mit hohem Lohnniveau nur 30 % (World Bank, 2003). Zur Zeit gibt es 276 Mio. ha bewässerte Landwirtschaftsflächen (FAOSTAT, 2006), was einem fünffachen Anstieg seit Beginn des 19. Jahrhunderts entspricht. Mit steigendem Bedarf an Bewässerung wird Wassermanagement zu einem wichtigen Thema. Zudem sind durch den Klimawandel weitere Probleme, v.a. mit der Nahrungsmittelproduktion, vorprogrammiert. Global gesehen sind etwa 3,6 Mrd. ha (ungefähr 27 % der Landfläche) zu trocken für niederschlagsbewässerte Landwirtschaft. Berücksichtigt man die Wasserverfügbarkeit, sind nur etwa 1,8 % dieser trockenen Zonen dafür geeignet, Getreideanbau mit Bewässerung zu betreiben (Fischer et al., 2002). Gemäß FAO wird die jährliche Zuwachsrate der landwirtschaftlichen Produktion daher voraussichtlich im Zeitraum 2000–2015 von 2,2 % auf 1,6 %, 2015–2030 auf 1,3 % und 2030–2050 auf 0,8 % sinken (FAO, 2006b). Verglichen mit der Periode 1999–2001 bedeutet dies dennoch einen Anstieg der globalen Getreideproduktion um 55 % bis 2030 und um 80 % bis 2050. Dafür müssten allerdings weitere 185 Mio. ha niederschlagsbewässerter (+19 %) und 60 Mio. ha bewässerter Landfläche (+30 %) für den Anbau von Getreide herangezogen werden. Durch den prognostizierten Rückgang der Wasserverfügbarkeit in manchen Regionen durch den Klimawandel könnten diese Gebiete (wie etwa das Mittelmeerbecken, Zentralamerika und die subtropischen Regionen Afrikas und Australiens) jedoch für niederschlagsbewässerte Landwirtschaft zu trocken werden (Easterling et al., 2007). Zusätzlich zu klimabedingten, regionalen Problemen der Wasserverfügbarkeit weisen Scanlon et al. (2007) darauf hin, dass die Auswirkungen vergangener Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt in vielen Gebieten auf Grund zeitverzögerter Ökosystemantworten (z.B. Grundwassererneuerung, Wasserqualität) bisher noch nicht sichtbar wurden und in der Zukunft zu Wassernutzungskonkurrenzen führen können.

4.2.3 Der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf Ökosystemleistungen

Durch landschaftliche Eingriffe des Menschen verändern sich mit Änderung der biologischen Vielfalt viele Ökosystemleistungen, von der Kohlenstoffspeicherung im Boden und in der Vegetation über die Emissionen von Treibhausgasen bis hin zur Erosionskontrolle und ästhetischen Aspekten. Vor allem die biologische Vielfalt (oder Biodiversität) wird von den Landnutzungsänderungen, die im Hinblick auf die Bioenergienutzung relevant sind, stark beeinflusst (Kap. 5.4). Im Folgenden werden die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen von verschiedenen Ökosystemtypen auf die Kohlenstoffspeicherung, die Treibhausgasemissionen und die biologische Vielfalt angesprochen.

4.2.3.1 Konversion von Wald

Für die Nutzung von Bioenergie – wie auch für die landwirtschaftliche Nutzung überhaupt – wurden und werden die benötigten Flächen häufig aus ehemaligen Waldflächen rekrutiert (Kap. 4.2.1). Zudem nehmen in der Diskussion um Bioenergienutzung Wälder aufgrund des potenziellen Verlusts der größten Kohlenstoffspeicher und -senken innerhalb der terrestrischen Biosphäre einen zentralen Platz ein. Rund 20 % aller anthropogenen CO_2-Emissionen werden durch die Rodung von Wäldern verursacht (IPCC, 2007b). Die CO_2-Emissionsrate durch Waldverluste in den 1990er Jahren wird auf durchschnittlich 1,6 (0,5–2,7) Gt C pro Jahr geschätzt (Cramer et al., 2004; IPCC, 2007a). Die FAO (2006c) geht im Zeitraum 1990–2005 von einer jährlichen Abnahme des Kohlenstoffvorrats in der lebenden Biomasse von Wäldern sogar von 4 Gt aus.

Global speichern Wälder heute schätzungsweise 638 Gt C, wobei ungefähr die Hälfte in der lebenden Biomasse und im Totholz (MA, 2005b), die andere Hälfte im Boden und der Streuauflage gebunden ist (FAO, 2006c). Dies entspricht ungefähr 40 % des in der terrestrischen Biosphäre vorhandenen Kohlenstoffs (Matthews et al., 2000). Bei einer Nutzungsänderung von Wald zu Bioenergiepflanzenanbau müssten die dadurch entstandenen Kohlenstoffverluste also erst kompensiert werden, bevor die Treibhausgasbilanz der Bioenergie positiv werden könnte (Kap. 6.4.3.3). Dabei muss berücksichtigt werden,

Abbildung 4.2-5
Veränderung der Menge organischen Materials auf dem Waldboden nach Kahlschlag nordischer Laubholzwaldbestände. Die Punkte sind Durchschnittswerte von 30 Proben pro Waldbestand mit 95 % Vertrauensintervallen.
Quelle: Bormann und Likens, 1979

dass es sich nicht nur um Kohlenstoff in der Biomasse, sondern auch im Boden handelt. Während in Südamerika (vor allem im tropischen Regenwald) etwa ein Drittel des gesamten Kohlenstoffs im Boden gespeichert wird, beträgt in europäischen Wäldern der Anteil des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs rund zwei Drittel (FAO, 2006c).

In den letzten 20 Jahren wurden die Kohlenstoffverluste als Folge von Landnutzungsänderungen durch die Rodung von Tropenwäldern für die Weide- und Ackernutzung dominiert (IPCC, 2007b). So fällt z. B. in Brasilien der Tropenwald weitflächig dem Anbau von Soja zum Opfer (Tollefson, 2008). Kritisch sind diese Kohlenstoffverluste durch Rodung vor allem deswegen, weil nicht nur große, sondern auch sehr alte Kohlenstoffspeicher vernichtet werden. Besonders die Kohlenstoffspeicher im Holz und Totholz können mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte, im Humus auch Jahrhunderte bis Jahrtausende gebunden sein (Vieira et al., 2005). Da sich die Kohlenstoffspeicher in ständiger Wechselwirkung mit der Umgebung befinden, sind die Auswirkungen einer Rodung von Wäldern für die Bioenergienutzung regional sehr unterschiedlich. Beispielsweise hängt die Veränderung der Kohlenstoffspeicher im Boden gerodeter tropischer Wälder, die zu Weiden konvertiert werden, stark vom jeweiligen Bodentyp ab (Abb. 4.2-5; Bormann und Likens, 1979; López-Ulloa et al., 2005). So verlor eine Weidefläche auf ehemaligem Regenwaldboden nach 25 Jahren bei einem lehmigen Untergrund netto fast fünfzehnmal soviel organischen Kohlenstoff pro Fläche wie unter einem Sandboden, wo der Kohlenstoffspeicher in diesem Zeitraum fast konstant blieb (van Dam et al., 1997). Zudem hängt es stark von Art und Intensität der Landnutzungsänderung im Rahmen einer Bioenergienutzung ab, wie viel Kohlenstoff das Ökosystem verliert. Ob nur der jährliche Zuwachs für die traditionelle Bioenergienutzung verwendet wird, ob ganze Bäume oder große Flächen für eine Bioenergieplantage gerodet werden oder ob der Boden durch Erntemaschinen oder Feuer in Mitleidenschaft gezogen oder gar erodiert wird, bestimmt maßgeblich, welche direkten Auswirkungen die Konversion auf die Kohlenstoffverluste hat.

Darüber hinaus hat der verbleibende Kohlenstoffspeicher, sei es im Boden oder in der zurückbleibenden Vegetation, einen deutlichen Einfluss auf den weiteren Verlauf der Kohlenstoffverluste. Bleibt viel tote Biomasse nach der Rodung auf der Fläche zurück oder sind die Böden reich an organischer Substanz, dann wird diese von Mikroorganismen abgebaut, solange keine neue Vegetation den Boden beschattet (Bormann und Likens, 1979). So können junge Baumplantagen je nach Baumart und Region durch eine erhöhte Bodenatmung mehrere Jahre bis Jahrzehnte noch Kohlenstoffquellen sein, trotz Wachstums der Bäume (Abb. 4.2-6; Harcombe et al., 1990; Buchmann und Schulze, 1999; Baldocchi, 2008).

Auch der Stickstoffhaushalt ist von Landnutzungsänderungen betroffen. Durch Rodung tropischer Wälder erhöhen sich die Lachgas- und Stickoxidemissionen in Abhängigkeit des Stickstoffeintrags, der Temperatur und der Feuchtigkeit um 30–350 % (IPCC, 2007b). Wird die Fläche nicht gerodet, sondern abgebrannt, dann entweicht der Kohlenstoff aus Biomasse und Boden während des Verbrennungsprozesses sofort als CO_2, bei unvollständiger Verbrennung auch als CO und Methan in die Atmosphäre. Wald- und Buschbrände (ohne Brandrodungen) setzten jährlich 1,7–4,1 Gt C frei, was etwa 3–8 % der gesamten terrestrischen Nettoprimärproduktion entspricht (IPCC, 2007b). Ungefähr 14 % der anthropogenen Methanemissionen werden auf das Verbrennen von

Abbildung 4.2-6
Die Beziehung zwischen dem Nettokohlenstofffluss und dem Waldbestandsalter nach einer Störung. Die Daten stammen aus mehreren Chronosequenzstudien über Nadelbäume aus Zentral- und Westkanada und der pazifischen Nordwestküste der USA.
Quelle: Baldocchi, 2008

Biomasse zurückgeführt (Wuebbles und Hayhoe, 2002). Die Kohlenstoffverluste sind auch hier regional in Abhängigkeit von der Landbedeckung sehr unterschiedlich und hängen zudem von der Feuerintensität ab. Vor allem bei Glimmbränden mit unvollständiger Veraschung entstehen erhebliche Methanemissionen. Die Auswirkungen sind zudem auch langfristig wirksam. Durch das Fehlen der organischen Substanz im Boden wird die Bodenfruchtbarkeit vermindert und die Bodenstruktur verschlechtert, was häufig zu erhöhtem Oberflächenabfluss von Wasser sowie zu Erosion führt. Andererseits erhöht sich die Verweilzeit des Kohlenstoffs im Boden drastisch durch die Bildung von Holzkohle (Kap. 5.5).

In tropischen Regenwäldern führen die intern fast geschlossenen Nährstoffkreisläufe durch eine große Zahl beteiligter Organismen zu einer sehr hohen Produktivität. Eine Störung dieser Kreisläufe kann verheerende Auswirkungen auf die biologische Vielfalt haben (WBGU, 1999; Kap. 5.4). Durch den Verlust von Waldflächen und die Fragmentierung der Landschaft wird wichtiger Lebensraum zerstört. Tropische Regenwälder sind die artenreichsten terrestrischen Ökosysteme. So leben 15 % aller Pflanzenarten in tropischen Regenwäldern mit außerordentlich hoher Artendichte auf einer Fläche, die lediglich 0,2 % der globalen Landfläche ausmacht (Mooney et al., 1995). Obwohl sich einige Arten durchaus an neue Lebensräume anpassen können, haben viele endemische Arten eine extrem lokale Ausbreitung, was ihre Ausrottung durch die Umwandlung von Wald in Kulturflächen begünstigt. So kommen z.B. viele Pflanzenarten des tropischen Nebelwaldes in Lateinamerika auf einer Fläche von weniger als 10 km^2 vor (Mooney et al., 1995).

Abschließend kann gesagt werden, dass die Konversion von Wäldern in Weiden oder Ackerflächen immer mit erheblichen Kohlenstoffverlusten verbunden ist und daher keine Option für einen effizienten Klimaschutz darstellt.

4.2.3.2 Konversion von Feuchtgebieten

Auch die Produktivität von Feuchtgebieten und die Kohlenstoffspeicherung in organischen Böden sind regional extrem unterschiedlich. So zählen Feuchtgebiete zu den produktivsten Standorten überhaupt. Moore bedecken lediglich 3–4 % der terrestrischen Landoberfläche, speichern aber rund 25–30 % des global in Pflanzen und Böden gebundenen Kohlenstoffs, was ca. 540 Gt C entspricht (MA, 2005b). Sibirische Hochmoore speichern bis zu 2 kg C pro m^2 und Jahr (Peregon et al., 2008).

Große Kohlenstoffmengen werden bei der Trockenlegung und Rodung bewaldeter Moorböden in Südostasien freigesetzt. Solche Moorböden in Indonesien, Malaysia, Brunei und Papua Neuguinea speichern schätzungsweise 42 Gt C (Hooijer et al., 2006). Vor allem zur Kultivierung von Ölpalmen sind bereits 45 % dieser Wälder gerodet und der Untergrund drainiert worden. Die getrockneten organischen Böden sind anfällig für Feuer, die für weitere Kohlenstoffverluste aus dem Ökosystem verantwortlich sind. Hoojer et al. (2006) schätzen die durch den Verlust der Moorböden entstandene CO_2-Emission auf 632 Mt pro Jahr, mit einem möglichen Anstieg zwischen 2015–2035 auf ein Emissionsmaximum von ungefähr 823 Mt pro Jahr. Die CH_4-Emissionen in tropischen Feuchtgebieten liegen im Vergleich zum Kohlenstoff, der als CO_2 entweicht, im Promillebereich (Jauhiainen et al., 2005).

Aber auch die biologische Vielfalt wird bei einer Umnutzung stark in Mitleidenschaft gezogen (Kap. 5.4). So wird bei der Trockenlegung von Feuchtgebieten durch das Eindringen von Sauerstoff das Ökosystem abrupt geändert, was zum Aussterben vieler, an diesen speziellen Lebensraum angepasster Tierarten führt. Die völlig veränderten hydrologischen Bedingungen gefährden zudem viele höhere Pflanzen (MA, 2005c) und haben einen Einfluss auf das Wasserregime und den lokalen Wasserkreislauf. Aus diesen Gründen ist eine Umnutzung von Feuchtgebieten für den Energiepflanzenanbau abzulehnen.

4.2.3.3 Konversion von Grasland

Grasland bzw. (meist degradierte) Weideflächen, die dominante Nutzungsform von Grasland weltweit, werden in der Bioenergiediskussion gern genannt, wenn es um potenzielle Flächenreserven geht. Graslandökosysteme bedecken – je nach Definition und Datenerhebung – von über 20 % bis zu 40 % der Kontinentalflächen (White et al., 2000; Scanlon et al., 2007). In den letzten vierzig Jahren haben sich die Weideflächen global um 10 % auf rund 3.500 Mio. ha ausgedehnt, was einem Anteil von 69 % an der landwirtschaftlich genutzten Landfläche entspricht (FAOSTAT, 2006; IPCC, 2007c). Während im Grasland die Kohlenstoffspeicher kleiner sind als im Wald, weil der Kohlenstoffspeicher fast nur im Boden vorhanden ist, ist der Verlust biologischer Vielfalt bei einer potenziellen Umnutzung von Grasland für Bioenergienutzung von großer Bedeutung.

Durch ihre große Ausbreitung sind Graslandböden wichtige globale Kohlenstoffspeicher, sie enthalten etwa 34 % des in terrestrischen Ökosystemen vorhandenen Kohlenstoffs (White et al., 2000). In

Graslandökosystemen wird zwar im Mittel weniger Kohlenstoff pro Fläche gespeichert als in Wäldern, jedoch wesentlich mehr als auf Ackerflächen (Kirby und Potvin, 2007). In tropischen Savannen werden durch Wildfeuer erhebliche Kohlenstoffmengen freigesetzt (White et al., 2000; IPCC, 2007). Tylianakis et al. (2008) konnten zeigen, dass die Produktion unterirdischer Biomasse positiv mit dem Pflanzenreichtum in temperaten Grasländern korreliert ist, umso stärker, je heterogener die Standorte räumlich waren. Die durch den Menschen verursachten Veränderungen im Kohlenstoffkreislauf von Graslandökosystemen sind die Folge von Ackerkultur, Urbanisierung, Bodendegradation, Beweidung, Feuer, Fragmentierung und der Einführung nichtheimischer Organismen (White et al., 2000). Eine intensive Graslandbewirtschaftung führt in den temperaten Breiten wegen der höheren Wurzelproduktion zu einem höheren Kohlenstoffeintrag in den Boden als eine extensive Bewirtschaftung und bringt pro Hektarertrag keine substanziell höheren Umweltbelastungen mit sich (Kägi et al., 2007).

Die Aufforstung von Weideflächen führt, je nach Alter der Weide, zur Zunahme des organischen Kohlenstoffs im Boden. De Koning et al. (2003) beobachteten jedoch eine niedrigere Kohlenstoffspeicherung im Sekundärwald verglichen mit jungen Weideflächen, die weniger als 10 Jahre alt waren, während bei 20–30jährigen Weideflächen die Aufforstungen um bis zu 20 % mehr Kohlenstoff pro Jahr akkumulierten. Die Aufforstung mit Bäumen ist der Ackernutzung mit mehrjährigen Pflanzen zudem klar vorzuziehen, weil durch die geringere Nutzungshäufigkeit und -intensität meist auch weniger Kohlenstoff durch Bodenatmung verloren geht. In semiariden Gebieten kann die Konversion beweideter Buschsteppe zu Wald innerhalb von 35 Jahren zu einer erheblichen Zunahme der Kohlenstoffspeicherung im Boden führen (Grünzweig et al., 2007).

Beim Umbruch von Grasland zur Gewinnung von Ackerfläche wird hingegen durch die Zunahme der Bodenatmung CO_2 freigesetzt. Der Boden verliert die ganzjährige und mehrjährige Vegetationsdecke und wird dadurch erosionsanfälliger. Ähnlich sind die Mechanismen bei der Übernutzung von Grasland durch zu hohen Tierbesatz. Diese Konversion von Grasland kommt vor allem in ariden und semiariden Gebieten vor (Sahel, Zentralasien), wo die Biomasseproduktion schon klimatisch bedingt gering ist. Die Überweidung und der damit verbundene Vegetationsverlust führen zu Bodenerosion mit Kohlenstofffreisetzung und leisten damit der Desertifikation Vorschub (Steinfeld et al., 2006). Graslandökosysteme bergen zudem eine große Artenvielfalt. 40 der von der IUCN global identifizierten 234 Zentren außerordentlicher Pflanzendiversität (Centres of Plant Diversity, CPD) liegen in Grasländern. Weitere 70 dieser CPD enthalten auch Graslandlebensräume. Damit sind Graslandökosysteme in fast der Hälfte der identifizierten CPD vertreten (White et al., 2000). Viele dieser Grasland-Hotspots der Pflanzendiversität bieten gleichzeitig einer großen Anzahl endemischer Vogelarten Lebensraum (White et al., 2000). Je intensiver die menschliche Interaktion mit diesen Ökosystemen ist, umso größer ist der Verlust biologischer Vielfalt (Mooney et al., 1995). Bei der Umwandlung von Grasland in Ackerflächen nimmt die Biodiversität rapide ab.

Graslandökosysteme, vor allem mit großer Pflanzendiversität, stellen also eine leistungsfähige Option zur Kohlenstoffsequestrierung dar, während ihre abgeerntete Biomasse einer klimaschonenden energetischen Nutzung zugeführt werden kann (Rösch et al., 2007; Tilman et al., 2006). Eine Umnutzung für die Ackerrotation ist daher abzulehnen, während eine Umnutzung durch Aufforsten für die Kohlenstoffsequestrierung positiv und für die biologische Vielfalt situationsbedingt zu bewerten ist. Differen-

Abbildung 4.2-7
Organischer Kohlenstoff in zwei Bodentiefen in Abhängigkeit der Vegetationsdecke.
Rutenhirse 5-Jahre: das Feld wurde in einem 5-Jahres-Rhythmus abgebrannt.
Rutenhirse 1-Jahr: das Feld wurde jährlich abgebrannt.
*Messtiefe 0–15 cm und 30–45 cm.
Quellen: Lemus und Lal, 2005; Al-Kaisi und Grote, 2007; Kirby und Potvin, 2007

zierter ist das Bild bei einer Umnutzung von bestehendem, intaktem Grasland bzw. von Grasland auf degradierten Flächen für mehrjährige Anbaukulturen. Hier müssen die Auswirkungen auf den Kohlenstoffspeicher im Boden (negativ oder positiv) und auf die biologische Vielfalt (negativ) sorgfältig abgewogen werden.

4.2.3.4
Konversion von Ackerflächen

Der Kohlenstoffspeicher im Boden von Ackerflächen und Weiden ist sehr variabel und hängt von der Bewirtschaftungsweise, dem Klima und der angebauten Ackerfrucht ab (Abb. 4.2-7).

Die intensive Landwirtschaft beschränkt sich meist auf eine schmale Palette von Ackerfrüchten mit geringer genetischer Diversität, die für hohe Ernteerträge gezüchtet wurde und den Einsatz von künstlichem Dünger, Pflanzenschutzmitteln und teils auch Bewässerung benötigt. Weniger intensiv bewirtschaftete Ackerkulturen weisen dagegen eine höhere Biodiversität auf (Mooney et al., 1995), die Artenvielfalt ist aber gegenüber anderen Ökosystemen vergleichsweise niedrig.

Bei der Umnutzung von Ackerflächen zu Grasland vergrößert sich der Kohlenstoffspeicher im Boden. Dieser Prozess vollzieht sich langsam und dauert Jahrzehnte. Die höhere Kohlenstoffspeicherungsrate ist auf die meist ganzjährige Bodenbedeckung mit einer höheren unterirdischen Produktivität und einer geringeren Bodenbearbeitung im Grasland zurückzuführen, wodurch Erosion und CO_2-Verluste durch Bodenatmung verringert werden (Yimer et al., 2007).

Eine Option zur Kohlenstoffspeicherung auf Ackerflächen stellt die Aufforstung mit Kurzumtriebsplantagen dar (z.B. Hansen, 1993; Mann und Tolbert, 2000; Grogan und Matthews, 2002; Kap. 7.1.2). Mehrjährige Kulturen leisten außerdem einen wirksamen Bodenschutz gegen Erosion und damit gegen den Verlust organisch gebundenen Kohlenstoffs im Boden (Lewandowski und Schmidt, 2006). Insgesamt betrachtet ist daher die Umnutzung von Ackerflächen für mehrjährige Anbaukulturen oder sogar für Wiederaufforstung positiv zu bewerten.

4.2.4
Zusammenfassende Bewertung

Die Umwandlung von Waldflächen und Feuchtgebieten in Agrarland ist für die biologische Vielfalt und den Kohlenstoffspeicher im Boden grundsätzlich negativ zu bewerten. Mit der Umwandlung solcher Flächen sind große Treibhausgasemissionen verbunden. Die Biodiversität und der Kohlenstoffspeicher im Boden sind im Wald, im Grasland oder auf Weiden größer als auf Acker- und degradierten Flächen, wobei mehrjährige Anbaukulturen sich auf die genannten Faktoren positiver auswirken als einjährige. Bei der Anbaukultur in Rotation werden in der Regel Treibhausgase freigesetzt: Der Boden verliert im Jahresmittel durch die Bewirtschaftung mehr CO_2 als durch Streufall neu eingetragen wird und eine intensive N-Düngung kann zur Freisetzung von klimaschädlichem N_2O führen (Tab. 4.2-1).

Tabelle 4.2-1
Qualitative Bewertung der Auswirkungen direkter Landnutzungsänderungen auf die biologische Vielfalt, die Kohlenstoffmenge in Boden und Vegetation (Zeitrahmen: >10 Jahre) sowie die Treibhausgasverluste bei der Konversion. Für die Bewertung der Konversion wurden nur die Effekte direkter Landnutzungsänderungen betrachtet. Anbau, 1–3 jährig = Anbaukultur in 1–3-jähriger Rotation; Anbau, mehrjährig = mindestens 5-jährige Anbaukultur, z.B. Kurzumtriebsplantage, *Jatropha*, Ölpalme.
Quelle: WBGU

Konversion von	zu	Bewertung
Wald	Anbau, 1–3 jährig	negativ
	Anbau, mehrjährig	negativ
	Grasland, Weide	negativ
Feuchtgebiet	Anbau, 1–3 jährig	negativ
	Anbau, mehrjährig	negativ
	Grasland, Weide	negativ
Grasland, Weide	Anbau, 1–3 jährig	negativ
	Anbau, mehrjährig	nicht eindeutig
	Wald	positiv
Degradierte Fläche	Anbau, 1–3 jährig	negativ
	Anbau, mehrjährig	nicht eindeutig
	Grasland, Weide	positiv
Ackerfläche	Anbau, mehrjährig	positiv
	Grasland, Weide	positiv
	Wald	positiv

Auswirkungen
negativ
nicht eindeutig
positiv

Nutzungskonkurrenzen 5

5.1 Einleitung

Die fruchtbaren Landflächen weltweit sind knapp und unterliegen sehr unterschiedlichen Nutzungsansprüchen. Vor dem Hintergrund einer wachsenden Weltbevölkerung kann es nicht gelingen, allen Nutzungsansprüchen im gewünschten Ausmaß gerecht zu werden. Vielmehr müssen bewusste Entscheidungen für den Vorrang bestimmter Ansprüche und gegen die Dominanz anderer getroffen werden. Der Mensch nutzt derzeit ca. 34 % der globalen Landfläche für landwirtschaftliche Zwecke, insbesondere zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion (Kap. 4.2.2 und 5.2). Hinzu kommt die wachsende Bedeutung pflanzlicher Biomasse für die stoffliche Nutzung in Produkten (Kap. 5.3). Das agrarwirtschaftliche Flächenpotenzial wird durch Schutzerfordernisse zum Erhalt der natürlichen Umwelt, insbesondere dem Erhalt naturnaher und natürlicher Flächen (Kap. 5.4) und des Klimaschutzes (Kap. 5.5) eingeschränkt. Weitere Einschränkungen ergeben sich durch Übernutzung, insbesondere die voranschreitende Bodendegradation, sowie die Verknappung und Verschmutzung von Süßwasservorräten (Kap. 5.6). Auch Eingriffe in den natürlichen Oberflächenabfluss, wie etwa die Anlage großer Stauseen, tragen zur Verknappung von Flächen bei, die zum Anbau von Pflanzen geeignet sind. Daneben spielen auch die global zunehmende Urbanisierung sowie die Ausweitung der damit verbundenen Infrastruktur eine Rolle. Die Bildung von Städten, urbanen Agglomerationen und ihrer Infrastrukturen konzentriert sich meist auf die besonders fruchtbaren Regionen der Erde (z.B. Flussdeltabereiche, Schwemmfächer, Ufergebiete oder Flussgabelungen usw.). Dieser Trend geht in erster Linie zu Lasten von Agrarland. Die weitere Ausbreitung dieser städtischen Strukturen tritt daher in direkte Konkurrenz zur landwirtschaftlichen Nutzung von Böden in Siedlungsnähe. Städte und städtische Agglomerationen bedecken – je nach Art der Berechnung – derzeit zwischen 1,5 % und 2 % der Landoberfläche (berechnet nach Daten aus Salvatore et al., 2005; Girardet, 1996). Urbane Strukturen nehmen in Deutschland 4,8 % der Landesfläche ein (UBA, 2003a), in der EU-24 sind es etwa 5 % (EEA, 2006). Die unmittelbaren Wirkungen der Urbanisierung auf den Flächenverbrauch fallen im Weltmaßstab also quantitativ wenig ins Gewicht, so dass sie im Folgenden unberücksichtigt bleiben. Das folgende Kapitel erläutert Ausgangslage und die künftige Dynamik dieser weltweiten Nutzungskonkurrenzen vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung des Anbaus von Energiepflanzen.

5.2 Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion

5.2.1 Einleitung

Derzeit sind weltweit über 923 Mio. Menschen von Ernährungsunsicherheit betroffen, meist in Entwicklungsländern (FAO, 2006a; FAOSTAT, 2006). Ernährungsunsicherheit bezeichnet eine Situation, in der die betroffenen Menschen keinen Zugang zu ausreichender, unbedenklicher und nährstoffreicher Nahrung haben, die ihren physiologischen Notwendigkeiten und Nahrungsgewohnheiten genügt und ein aktives und gesundes Leben garantiert (FAO, 2001a). Den von Ernährungsunsicherheit betroffenen Menschen fehlt überwiegend das Einkommen, um die notwendigen Lebensmittel ganzjährig und verlässlich zu erwerben (FAO, 2006b). Die Ernährungsunsicherheit hat zwischen 2006 und 2008 durch die weltweit stark angestiegenen Preise für Nahrungsmittel deutlich zugenommen (UN, 2008). Das World Food Programme und die Weltbank schätzen, dass bei anhaltend hohen Lebensmittelpreisen zusätzlich mindestens 100 Mio. Menschen weiter verarmen und vom Hunger bedroht sein werden, vor allem in den so genannten Low-Income Food-Deficit Countries (LIFDC) (UN, 2008). Auf der anderen Seite könnten steigende Nahrungsmittelpreise Armut mildern, da das Einkommen vieler Agrarproduzenten steigt

und höhere Preise Anreize zur Produktionsausdehnung und damit Einkommensgenerierung bilden (Kasten 8.2-3). Eine ganze Reihe von Faktoren hat zu den gegenwärtig beobachtbaren, starken Preisanstiegen bei Nahrungsmitteln (2007/2008) beigetragen, wobei die jeweilige Bedeutung dieser Faktoren und die langfristige Preisentwicklung umstritten sind und noch genauer untersucht werden müssen (Kap. 5.2.5.2). Angesichts von global rund 5 Mrd. ha landwirtschaftlicher Flächen (davon 1,5 Mrd. ha Ackerflächen; Kap. 4.2), einschließlich Weideland, ist die für den Anbau von Energiepflanzen genutzte Fläche mit derzeit global etwa 20 Mio. ha relativ gering (Faaij, 2008). Wenn allerdings der weltweite Bioenergieboom immer mehr landwirtschaftliche Flächen beansprucht, könnte er zu einem kritischen Faktor für die globale Nahrungs- und Futtermittelproduktion werden.

5.2.2 Steigendes Angebot und Nachfrage nach Nahrung

Bisher ist das weltweite Bevölkerungswachstum der größte Einflussfaktor auf die Nahrungs- und Futtermittelnachfrage. Derzeit leben schätzungsweise 6,6 Mrd. Menschen auf der Erde, davon etwa 80 % in Entwicklungsländern (FAOSTAT, 2006). Bis 2030 wird die Weltbevölkerung auf ca. 8,3 Mrd. und bis 2050 auf ca. 9,2 Mrd. Menschen ansteigen (UNPD, 2006). Bereits bis 2030 müsste die globale Nahrungsproduktion um rund 50 % gesteigert werden, um eine Zunahme von Ernährungsunsicherheit zu vermeiden (OECD, 2008b).

Daneben stellen der Wandel der Ernährungsgewohnheiten in Folge von Verstädterung, steigender Einkommen sowie von damit verbundener Änderungen des Lebensstils weitere wichtige Einflussgrößen dar (von Koerber et al., 2008). In Industrieländern leben schon heute ungefähr drei Viertel der Bevölkerung in städtischen Gebieten, in Entwicklungsländern sind es knapp die Hälfte. Bis zum Jahr 2030 wird die städtische Bevölkerung weiter wachsen. Im globalen Durchschnitt werden dann 60 % der gesamten Weltbevölkerung in Städten leben, ein weiterer Anstieg wird erwartet (UNPD, 2006). Die Ernährung der städtischen Bevölkerung beinhaltet gegenüber ländlichen Ernährungsgewohnheiten tendenziell mehr helle Mehle, Fett, Zucker sowie verarbeitete Nahrungsmittel (Mendez und Popkin, 2004). Die für Städte typischen Angebotsstrukturen (z.B. Supermärkte, Schnellrestaurants) unterstützen diese Trends (Popkin, 2006).

Das verfügbare Einkommen ist für die Nahrungsmittelnachfrage ebenfalls sehr wichtig. In den nächsten 30 Jahren werden die realen Einkommen in Entwicklungsländern voraussichtlich um durchschnittlich 2 % pro Jahr steigen, in den am wenigsten entwickelten Ländern wird sogar ein Wachstum von 4 % erwartet (Schmidhuber und Shetty, 2005). Höhere Einkommen bedeuten zumeist eine vielfältigere Ernährung, einen erhöhten Verzehr hochwertiger Nahrungsmittel sowie von stärker verarbeiteten Erzeugnissen und Fertiggerichten (FAO, 2007d). Vor allem bei Fleisch und anderen tierischen Nahrungsmitteln ist mit steigender Nachfrage zu rechnen (Keyzer et al., 2005). Ist schließlich ein hohes Einkommensniveau erreicht, stagnieren (bei konstanter Bevölkerungsgröße) die Zuwächse beim Konsum tierischer Nahrungsmittel und es tritt eine Sättigung des Marktes ein (Delgado et al., 1999; Keyzer et al., 2005).

Im weltweiten Durchschnitt hat sich die Kalorienverfügbarkeit in den letzten Jahrzehnten hauptsächlich durch die Steigerung der Flächenproduktivität verbessert (Kap. 5.2.4.1). Allerdings wurde damit das Problem einer sehr unzureichenden Verteilung nicht gelöst. Von 1970 bis 2000 erhöhte sich die durchschnittliche Nahrungsenergieversorgung von rund 2.400 auf 2.800 kcal pro Person und Tag (Tab. 5.2-1). Während in den 1960er Jahren 57 % der Weltbevölkerung weniger als 2.200 kcal zur Verfügung hatten, trifft dies heute nur noch auf ungefähr 10 % der Menschen zu (FAO, 2003b). Diese Fortschritte wurden vor allem in den Entwicklungsländern erzielt und hängen stark von Erfolgen in einigen bevölkerungsreichen Regionen wie etwa Ostasien ab. So hat sich z.B. in China die Kalorienverfügbarkeit in kurzer Zeit sehr stark erhöht und nähert sich dem Niveau der Industrienationen tendenziell an (FAO, 2006b; FAOSTAT, 2008a).

In anderen Regionen, wie z.B. Afrika südlich der Sahara, konnte die Nahrungsversorgung hingegen seit den 1970er Jahren nicht nennenswert verbessert werden. Nur einzelne Länder (z.B. Nigeria, Ghana oder Benin) steigerten ihre Versorgung auf über 2.400 kcal pro Person und Tag (FAO, 2006b).

Die FAO erwartet, dass 2050 rund 90 % der Weltbevölkerung in Ländern mit einer durchschnittlichen Kalorienverfügbarkeit von über 2.700 kcal leben. Heute liegt dieser Wert bei etwa 51 %, vor 30 Jahren waren es nur ca. 4 % (FAO, 2006b). Die von der FAO berechnete Kalorienverfügbarkeit ist allerdings ein rein kalkulatorischer Wert, der sich aus den Länderdaten zu Produktion und Handel mit Nahrungsmitteln sowie der Bevölkerungszahl errechnet. Da der Zugang zu Nahrung jedoch innerhalb von Ländern sehr unterschiedlich verteilt ist, bleibt auch in Entwicklungsländern mit einer im Durchschnitt scheinbar Kalorienverfügbarkeit das Problem der Unterernährung bestimmter Bevölkerungsgruppen weiter ungelöst (FAO, 2006b).

Tabelle 5.2-1
Durchschnittlich verfügbare Nahrungsenergie in verschiedenen Weltregionen (kcal pro Person und Tag).[1] Mittelwerte für die jeweilige Drei-Jahres-Spanne; [2] einschließlich Südostasien
Quelle: FAO, 2006b

	1969/71[1]	1979/81[1]	1989/91[1]	1999/01[1]	2015	2030	2050
Entwicklungsländer	2.111	2.308	2.520	2.654	2.860	2.960	3.070
Afrika südlich der Sahara	2.100	2.078	2.106	2.194	2.420	2.600	2.830
Nordafrika/Naher Osten	2.382	2.834	3.011	2.974	3.080	3.130	3.190
Lateinamerika	2.465	2.698	2.689	2.836	2.990	3.120	3.200
Südasien	2.066	2.084	2.329	2.392	2.660	2.790	2.980
Ostasien[2]	2.012	2.317	2.625	2.872	3.110	3.190	3.230
Transformationsländer	3.323	3.389	3.280	2.900	3.030	3.150	3.270
Industrieländer	3.046	3.133	3.292	3.446	3.480	3.520	3.540
Welt	**2.411**	**2.549**	**2.704**	**2.789**	**2.950**	**3.040**	**3.130**

5.2.3 Änderung von Ernährungsgewohnheiten als Herausforderung

Mit der Zunahme der verfügbaren Nahrungskalorien verschiebt sich auch die Nahrungszusammensetzung. In vielen Entwicklungsländern wird im Zuge wirtschaftlicher Fortschritte eine sehr kohlenhydratreiche Ernährung mit pflanzlichen Nahrungsmitteln (wie Getreide, Wurzeln, Knollen, Hülsenfrüchte) allmählich durch eine fett- und proteinreichere Ernährung verdrängt. Wie bereits erwähnt, wird der Anteil von tierischen Nahrungsmitteln, Zucker und Pflanzenölen an den gesamten Nahrungskalorien in den kommenden Jahrzehnten weiter steigen (FAO, 2006b; Popkin, 2006).

5.2.3.1 Einzelne Nahrungsmittel im Überblick: Globale Trends

Getreide

Getreide ist heute mit einem Anteil von 50 % am gesamten Nahrungskonsum die weltweit wichtigste Nahrungsmittelgruppe. In Entwicklungsländern basiert die Ernährung bis zu 80 % auf Getreide (FAO, 2006b). Der Pro-Kopf-Konsum von Getreide erreichte in den 1990er Jahren seinen Höhepunkt und fällt seit der Jahrtausendwende kontinuierlich. Nur in Afrika südlich der Sahara und Lateinamerika ist in den 1990er Jahren der Verzehr von Getreide weiter gestiegen (FAO, 2006b). Die Entwicklung des Getreidekonsums wird künftig von zwei gegensätzlichen Trends geprägt sein: Zum einen verändert sich die Nahrungsmittelauswahl vor allem in Ländern, die ein mittleres bis hohes Niveau im Nahrungskonsum erreicht haben, hin zu mehr tierischen Produkten. Zum anderen steigt der Getreideverzehr in Ländern, die weiterhin eine relativ niedrige Nahrungsversorgung aufweisen oder die ihre Ernährung von Wurzeln und Knollen auf Getreide umstellen. Es ist davon auszugehen, dass der Anteil an Getreide für den direkten Konsum weltweit langsam abnimmt. Betrachtet man jedoch alle Verwendungszwecke einschließlich Nahrung, Futtermittel und andere Verwendungen, wie Saatgut oder die Produktion von Ethanol und Stärke, wird der Verbrauch bis 2050 vermutlich von 309 kg pro Person im Jahr 2000 auf zu erwartende 339 kg ansteigen (FAO, 2006b). Vor dem Hintergrund der steigenden Nachfrage nach Fleisch ist Futtergetreide ein besonders wichtiger Faktor für die weitere Entwicklung des Getreidesektors. Im Jahr 2020 werden die Entwicklungsländer geschätzte 65 kg Futtergetreide pro Person und Jahr verwenden, die Industrienationen mit 374 kg etwa das Sechsfache (Delgado et al., 1999). Keyzer et al. (2005) merken diesbezüglich an, dass gängige Prognosen die Nachfrage nach Futtergetreide bislang oft stark unterschätzen. Für Entwicklungsländer wird bisher oft ein großer Anteil von nicht für den menschlichen Konsum geeigneten Stoffen (wie Haushaltsabfälle und Erntereste) als Futtermittel angenommen. Künftig wird jedoch eine Verlagerung von traditionellen zu getreideintensiven Fütterungsmethoden erwartet.

Fleisch, Milch und Milchprodukte

In Entwicklungsländern lässt sich die Veränderungen des Ernährungsstils am deutlichsten am steigenden Konsum tierischer Produkte nachvollziehen. Für diese Länder wird ein weiter steigender Konsum von Fleisch, Milch, Milchprodukten und Eiern prognostiziert. Dabei existieren große regionale und länderspezifische Unterschiede, auch in der Art der Produkte (Tab. 5.2-2).

Tabelle 5.2-2
Verbrauch von Fleisch, Milch und Milchprodukten in verschiedenen Weltregionen.
[1] ohne Butter; [2] Mittelwerte für die jeweilige Drei-Jahres-Spanne; [3] einschließlich Südostasien
Quelle: FAO, 2006b

	Fleisch [kg/Person/Jahr]				Milch/Milchprodukte[1] [kg/Person/Jahr]			
	1969/1971[2]	**1999/2001[2]**	**2030**	**2050**	**1969/1971[2]**	**1999/2001[2]**	**2030**	**2050**
Entwicklungsländer	10,7	26,7	38	44	28,6	45,2	67	78
Afrika südlich der Sahara	10,2	9,5	14	18	29,6	28,3	34	38
Nordafrika/Naher Osten	12,6	21,7	35	43	68,1	73,2	90	101
Lateinamerika	33,5	58,5	79	90	84,0	108,8	136	150
Südasien	3,9	5,5	12	18	37,0	67,6	106	129
Ostasien[3]	9,2	39,8	62	73	3,7	11,3	21	24
Transformationsländer	49,5	44,4	59	68	185,7	160,2	179	193
Industrieländer	69,7	90,2	99	103	189,1	214,0	223	227
Welt	**26,1**	**37,4**	**47**	**52**	**75,3**	**78,3**	**92**	**100**

Das langsame Wachstum des Fleischverzehrs wird stark durch Indien beeinflusst, das ca. 70 % der Bevölkerung Südasiens beheimatet und wo traditionell sehr wenig Fleisch verzehrt wird. Indien weist im globalen Vergleich den derzeit niedrigsten Fleischverzehr auf. Südasien verzeichnet einen langsamen, aber stetigen Anstieg tierischer Nahrungsmittel, vor allem von Milch und Milchprodukten, aber auch an Geflügelfleisch (FAO, 2003a). Mit höherem Einkommen und voranschreitender Verstädterung könnte hier die Nachfrage nach tierischen Produkten deutlich steigen (Rosegrant et al., 2001; Keyzer et al., 2005). Auch in Afrika südlich der Sahara werden vergleichsweise nur wenig tierische Nahrungsmittel konsumiert. Dort wird künftig ein geringes, aber stetiges Wachstum der Nachfrage nach tierischen Nahrungsmitteln erwartet. Der traditionell relativ hohe Fleischkonsum in Lateinamerika und der Milchkonsum werden weiter steigen (FAO, 2003a). In Ostasien steigen der Anteil tierischer Produkte und der Milchkonsum rapide an, vor allem bei Schweinefleisch und zu einem geringeren Anteil bei Geflügel (FAO, 2003a). Bis 2050 soll Ostasien hinter Lateinamerika den zweithöchsten Pro-Kopf-Konsum an Fleisch in den Entwicklungsregionen aufweisen. Der Fleischkonsum wird den Prognosen entsprechend in Zukunft langsamer wachsen als zwischen 1960 und 2000, da die Länder, die den rapiden Anstieg bisher geprägt haben (hauptsächlich China und Brasilien) zunehmend eine Sättigung ihrer Nachfrage erreichen (FAO, 2006b).

Zucker

Der Zuckerverbrauch ist in Industrie- bzw. Transformationsländern seit den 1970er Jahren von ca. 40 auf 33 bzw. 37 kg/Person/Jahr im Jahr 2000 gefallen. Die Transformationsländer werden den Prognosen zufolge entgegen der Entwicklung der letzten Jahrzehnte bis 2050 den Zuckerverbrauch auf 41 kg steigern. In Industrieländern wird er jedoch nahezu konstant bleiben (FAO, 2006b). Die Entwicklungsländer befinden sich hingegen in einem stetigen Aufwärtstrend und steigerten ihren Konsum seit 1970 von 15 auf 21 kg/Person/Jahr im Jahr 2000. Dieser Trend soll auch weiterhin bestehen.

Pflanzliche Öle

Der Anbau von Ölpflanzen ist in den letzten Jahrzehnten einer der am stärksten wachsenden Bereiche der Landwirtschaft und überholte in seiner jährlichen Wachstumsrate sogar die Tierhaltung. Den größten Einfluss darauf haben der zunehmende Verzehr von Pflanzenölen sowie der steigende Fleischverzehr. Der Konsum von pflanzlichen Ölen wird allerdings in Entwicklungsländern bis 2050 langsamer steigen als in den vergangenen Jahrzehnten (FAO, 2006b). Wesentlich schneller wird im gleichen Zeitraum der Verbrauch von Ölpflanzen für Reinigungsmittel, Schmierstoffe oder auch in Form von Biodiesel zunehmen (FAO, 2006b).

5.2.3.2 Flächenbedarf von Ernährungsgewohnheiten und Nahrungsmitteln

Flächenverfügbarkeit und Flächennutzung

Weltweit stehen etwa 34 % der vorhandenen Landfläche für eine landwirtschaftliche Nutzung zur Verfügung (Kap. 4.2.2). Davon ist der überwiegende Teil, d.h. 3.408 Mio. ha (69 %) extensives Weideland. Rechnet man die Futtermittelproduktion ein, dienen

rund 80 % der landwirtschaftlichen Flächen weltweit der Viehhaltung (Steinfeld et al., 2006). Dem steht ein nur geringer Anteil der tierischen Nahrungsmittel an der weltweiten Nahrungsversorgung gegenüber (nur 17 % im Jahr 2003; FAOSTAT, 2006).

Die landwirtschaftlichen Flächen haben sich in den letzten 40 Jahren (1963–2003) um knapp 460 Mio. ha vergrößert. Der Flächenzuwachs hat sich jedoch ab Mitte der 1990er Jahre abgeschwächt und findet nahezu ausschließlich in den Entwicklungsländern statt (Tab. 5.2-3; Steger, 2005). Die pro Kopf verfügbare Agrarfläche ist weltweit abnehmend (von Koerber et al., 2008).

Dies geht vor allem auf das starke Bevölkerungswachstum zurück, welches die moderate Flächenausweitung überkompensiert. In den Industrieländern geht ein leichtes Bevölkerungswachstum mit einem geringen Verlust an landwirtschaftlichen Flächen einher, was dementsprechend zu einer vergleichsweise geringen Abnahme der Fläche pro Person führt. Ackerflächen und Dauerkulturen lassen sich in Zukunft wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll nur noch bedingt ausweiten. Die FAO (2003b) geht von einem möglichen Anstieg der Ackerfläche um 13 % bis 2030 aus (Bezug 1997–1999). Die Weltbevölkerung wird bis dahin aber voraussichtlich um 22 % wachsen (UNPD, 2006), was weitere Produktivitätssteigerungen auf den vorhandenen bzw. neu gewonnenen Flächen erfordert, um eine Verschlechterung der Ernährungslage zu vermeiden. Verschärfend wirkt, dass die Industrieländer mehr landwirtschaftliche Flächen nutzen, als sie im eigenen Land besitzen. Diese virtuellen Flächen sind jedoch in Tabelle 5.2-3 nicht berücksichtigt. Beispielsweise erhöhen die EU-15-Staaten über Agrarimporte die ihr pro Person zur Verfügung stehenden Flächen um etwa 20 %. Hauptgrund dafür sind die Futtermittelimporte für die Intensivtierhaltung in Europa, v.a. Sojabohnen bzw. deren Presskuchen (Steger, 2005).

Flächenbedarf von Nahrungsmitteln

Neben den verfügbaren landwirtschaftlichen Flächen ist der spezifische Flächenbedarf zur Produktion von Nahrungsmitteln bedeutsam (Tab. 5.2-4).

Die zur Produktion benötigte Ackerfläche verschiedener pflanzlicher Nahrungsmittel variiert in den einzelnen Weltregionen sehr stark, abhängig von den jeweiligen Standortbedingungen und Anbauintensitäten, wie z.B. Bodenqualität, Klima, Einsatz von Dünger und Pflanzenbehandlungsmitteln (von Koerber et al., 2008).

In einer Fallstudie für den US-Bundesstaat New York wurde der spezifische Flächenbedarf von Nahrungsmitteln in Bezug zu ihrem Energiegehalt gesetzt (jeweils auf 1.000 kcal bezogen). Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, die unterschiedliche Energiedichte der Nahrungsmittel zu berücksichtigen (Tab. 5.2-5).

Bei diesen zugrunde gelegten Produktionsbedingungen wird ein deutlich höherer Flächenbedarf tierischer Nahrungsmittel gegenüber pflanzlichen Nahrungsmitteln sichtbar: um 1.000 kcal an Nahrungskalorien aus Rindfleisch zu erzeugen, werden 31 m^2 Land benötigt (bei überwiegend extensiver Weidehaltung), mit Getreide lediglich rund 1m^2 (ausschließlich Ackerfläche). Von den pflanzlichen Nahrungsmitteln beanspruchen Ölfrüchte die meiste Fläche (Peters et al., 2007).

Um den derzeitigen Nahrungsmittelverbrauch beispielsweise in Deutschland sicherzustellen, werden 17,2 Mio. ha Land benötigt. Dies entspricht in etwa der vorhandenen landwirtschaftlichen Nutzflä-

Tabelle 5.2-3
Landwirtschaftliche Fläche pro Person in verschiedenen Weltregionen (ha/Person).
Quelle: von Koerber et al., 2008 nach FAOSTAT, 2008a

	Landwirtschaftliche Fläche [ha/Kopf]			**Ackerfläche und Dauerkulturen** [ha/Kopf]		
	1962	**1982**	**2002**	**1962**	**1982**	**2002**
Afrika	3,60	2,15	1,32	0,56	0,37	0,26
Asien	0,64	0,46	0,39	0,26	0,18	0,15
Lateinamerika + Karibik	2,5	1,8	1,4	0,50	0,38	0,30
Nordamerika	2,4	1,9	1,5	1,1	0,92	0,87
Ozeanien	29,0	21,2	14,6	2,2	2,2	1,7
EU-15	0,51	0,43	0,37	0,31	0,25	0,22
Industrieländer	1,90	1,58	1,38	0,68	0,57	0,48
Entwicklungsländer	1,22	0,83	0,64	0,33	0,23	0,18
Welt	**1,43**	**1,0**	**0,80**	**0,44**	**0,32**	**0,25**

Tabelle 5.2-4
Flächenbedarf in m²/kg von Nahrungsmitteln in verschiedenen Ländern (2006, m²/kg Ertrag).
Quelle: von Koerber et al., 2008 nach FAOSTAT, 2008a

	Deutschland	Brasilien	Äthiopien	China	Indien	Ukraine	Welt
Ölfrüchte	2,8	4,1	15,3	4,1	8,7	7,6	3,9
Weizen	1,4	6,3	5,5	2,2	3,8	4,6	3,6
Reis	–	2,6	5,3	1,6	3,2	2,9	2,4
Mais	1,3	3,0	4,5	1,9	5,2	2,5	2,1
Obst	0,66	0,64	0,88	1,10	0,91	2,20	0,98
Kartoffeln	0,27	0,45	1,4	0,70	0,59	0,75	0,60
Gemüse	0,34	0,49	2,8	0,52	0,86	0,67	0,59

che, was eine Ernährung ohne Importe ermöglichen würde. Dabei stammen 39 % der Nahrungskalorien aus tierischen Nahrungsmitteln und 61 % aus pflanzlichen. Dies bedeutet bei ca. 80 Mill. Einwohnern einen Flächenbedarf von 0,22 ha/Person/Jahr (Seemüller, 2001). Um diesen Nahrungsmittelverbrauch ausschließlich aus ökologischem Anbau zu decken, würde wegen geringerer Erträge eine Fläche von 22,5 Mio. ha benötigt, also ca. 24 % mehr. Dies entspricht einem Flächenbedarf von 0,28 ha/Person/Jahr (gegenüber 0,22 ha bei konventionellen Nahrungsmitteln; Seemüller, 2001; Badgley et al., 2007).

5.2.3.3 Zusätzlicher Flächenbedarf durch Wandel der Ernährungsweise

Die optimistischen Einschätzungen internationaler Organisationen zur künftigen Ernährungssicherung stellen Keyzer et al. (2005) aufgrund mehrerer Aspekte in Frage. Besonders kritisch sehen sie den angenommenen Flächenbedarf für Getreide zur Fleischproduktion. In den üblichen Annahmen wird ein wachsender Konsum an tierischen Nahrungsmitteln linear zum Einkommensanstieg berechnet. Viele Menschen, die über mehr Kaufkraft verfügen, werden jedoch im Sinne eines nachholenden Konsums überproportional mehr Fleisch verzehren. Ab einem bestimmten Wohlstandsniveau wird in der Regel nicht mehr Fleisch, sondern Fleisch höherer Qualität nachgefragt. Trotzdem wird insgesamt die steigende Nachfrage nach Fleisch häufig wohl eher unterschätzt, da in vielen Entwicklungsländern große Teile der Bevölkerung an der Schwelle zu größeren Konsummöglichkeiten stehen (von Koerber et al., 2008).

Eine so genannte „Wohlstandsernährung“ beinhaltet nicht nur erhöhten Fleischkonsum, sondern z.B. auch einen steigenden Verzehr von Speiseöl, Getränken, Obst, Käse, Kekse und Eiscreme, wodurch weiterer Flächenbedarf entsteht (Gerbens-Leenes et al., 2002). Zwar wäre die Landwirtschaft grundsätzlich imstande, den Nahrungsgrundbedarf einer wachsenden Weltbevölkerung zu sichern. Die globale Verbreitung einer Wohlstandsernährung mit entsprechend hohem Fleischanteil wäre aus Gründen der Tragfähigkeit allerdings nicht möglich. Gleichen sich die Ernährungsgewohnheiten in Entwicklungsländern den westlichen Ländern an, würde der weltweite Flächenbedarf auf das 2–3fache ansteigen (Gerbens-Leenes et al., 2002). Zu einer ähnlichen Einschätzung kommen auch Balmford et al. (2005). In China und Brasilien zeichnet sich eine derartige Angleichung der Ernährungsgewohnheiten bereits, ab in anderen Regionen wird sie für die nächsten Jahrzehnte prognostiziert (FAO, 2003a, 2006b). Dadurch wird der Druck auf die Landflächen weiter verstärkt.

Tabelle 5.2-5
Flächenbedarf von Lebensmitteln pro verzehrsfähiger Energie des Produkts (basierend auf den Erträgen in den USA, Fallstudie Bundesstaat New York). Der Flächenbedarf berücksichtigt Acker- und Weideland.
Quelle: Peters et al., 2007

	Flächenbedarf [m²/1.000 kcal]
Tierische Nahrungsmittel	
Rindfleisch	31,2
Geflügelfleisch	9,0
Schweinefleisch	7,3
Eier	6,0
Vollmilch	5,0
Pflanzliche Nahrungsmittel	
Ölfrüchte	3,2
Obst	2,3
Hülsenfrüchte	2,2
Gemüse	1,7
Getreide	1,1

5.2.4 Grenzen für die Potenziale der Nahrungsproduktion

Nach Prognosen der FAO werden bis 2030 etwa 50 % mehr Nahrungsmittel benötigt, um die dann über 8 Mrd. Menschen zählende Weltbevölkerung zu ernähren. Da die Möglichkeiten für eine Ausdehnung der Anbauflächen nicht zuletzt durch Wasserverfügbarkeit und Bodendegradation sowie die Erfordernisse des Naturschutzes sehr begrenzt sind (Kap. 5.4 und 5.6), müsste diese Steigerung zu 80 % durch eine intensivere, zugleich aber nachhaltige und umweltverträgliche Landwirtschaft realisiert werden (FAO, 2003a). Für die letzten 40 Jahre geht die Steigerung der globalen Nahrungsproduktion überwiegend (zu etwa 80 %) auf Steigerungen der Flächenproduktivität zurück. Durch die Modernisierung der Landwirtschaft und den Wechsel von Zugtieren zu Maschinen wurden ebenfalls Flächen frei, die früher zur traditionellen „Kraftstoffbereitstellung", d.h. zur Ernährung der Tiere, verwendet wurden. In den Entwicklungsländern waren diese Produktivitätsfortschritte je nach Land und Region sehr unterschiedlich. Vor allem Afrika südlich der Sahara war von diesen Produktivitätsfortschritten ausgenommen (Brüntrup, 2008). Die Steigerung der Flächenerträge wird auch künftig ein Hauptfaktor der Produktionssteigerungen sein, allerdings mit abnehmenden Zuwachsraten aufgrund hoher Rohöl und Energiepreise, abnehmender Ertragszuwächse durch Grenzen aktueller Technologien, Bodenerosion und Übernutzung von Süßwasserressourcen (Brüntrup, 2008). Die FAO prognostiziert etwa, dass die jährliche Wachstumsrate der Weltgetreideproduktion von heute 1 % bis 2015 auf 1,4 % steigen und danach auf 1.2 % sinken wird (zum Vergleich.: 1970er: 2,5 % p.a.; 1980er: 1,9 % p.a.; 1990er: 1 % p.a.; FAO, 2003a; OECD und FAO, 2005, 2006). Diese Abschätzungen berücksichtigen allerdings nicht den Einfluss des Klimawandels, der die landwirtschaftliche Produktivität mittelfristig weltweit beeinträchtigen wird (Kap. 5.2.4.2).

5.2.4.1 Flächenpotenziale und Bodendegradation

Laut Prognosen der FAO wird sich die weltweite Ackerfläche bis 2030 gegenüber 1997–1999 um ca. 13 % ausweiten lassen – jedoch zu einem beträchtlichen Anteil durch Entwaldung (FAO, 2003a). Unberücksichtigt bei dieser Abschätzung sind die negativen Effekte der Degradation von Flächen durch Bodenerosion und Entwaldung sowie der Klimawandel (WBGU, 2008). Die Produktivität neu erschlossener Flächen wird sehr wahrscheinlich niedriger sein als die des bisherigen Ackerlandes, vor allem wenn zunehmend marginale Flächen in Kultur genommen werden, die zudem weit entfernt von den Märkten liegen (Rosegrant et al., 2001; Balmford et al., 2005). Das Potenzial an kultivierbarem Land ist sehr ungleich verteilt. Über die Hälfte entfällt auf nur sieben Länder, nämlich Angola, Kongo und Sudan in Afrika sowie Argentinien, Bolivien, Brasilien und Kolumbien in Südamerika. Dagegen sind beispielsweise im Nahen Osten bereits 87 % und in Südasien 94 % des geeigneten Landes kultiviert. Daher müsste in diesen Ländern sowie in Ostasien und Nordafrika eine Produktionssteigerung nahezu ausschließlich durch eine Erhöhung der Flächenproduktivität erfolgen (Beese, 2004).

Ein Hinweis auf den Druck, dem Ökosysteme durch menschliche Nutzung bereits heute ausgesetzt sind, gibt der so genannte HANPP-Wert (menschliche Aneignung der potentiellen Nettoprimärproduktion, human appropriation of net primary production). Dieser zeigt auf, welcher Anteil der potentiellen Nettoprimärproduktion (NPP) durch menschliche Aktivitäten genutzt wird. Haberl et al. (2007) schätzen diesen Wert global auf rund 25 %. Land- und forstwirtschaftliche Nutzung sind für ca. 85 % dieses HANPP verantwortlich, ca. 7 % gehen durch Feuer verloren. Folgen eines weiterhin steigenden HANPP sind Übernutzung der Ökosysteme und Bodendegradation, Gefährdung von Arten und die Anreicherung von Kohlendioxid in der Atmosphäre. Tab. 5.2-6 gibt einen Überblick über die regionale Verteilung des HANPP-Wertes (Kap. 4.2).

5.2.4.2 Einfluss des Klimawandels auf Produktionspotenziale

Die globale landwirtschaftliche Produktion wird voraussichtlich bei einer Temperaturerhöhung von 1–3°C (gegenüber 1990) zunächst insgesamt zunehmen, weil Rückgänge in vielen Entwicklungsländern durch höhere Erträge in Regionen höherer Breitengrade überkompensiert werden können (WBGU, 2007). Besonders starke Rückgänge werden in Afrika zu verzeichnen sein, weil die landwirtschaftlich nutzbaren Flächen in ariden und semi-ariden Gebieten abnehmen und die Länge der Anbauperiode sowie die potenziellen Erträge zurückgehen werden. In einigen Ländern südlich der Sahara können die Erträge des Regenfeldbaus bis 2020 um bis zu 50 % sinken (Lal et al., 2005; IPCC, 2007b). Ab einer Erwärmung der globalen Mitteltemperatur von 2–4°C wird die landwirtschaftliche Produktivität voraussichtlich weltweit zurückgehen. Ab einer Temperaturerhöhung von mehr als 4°C ist schließlich mit

erheblichen Beeinträchtigungen der globalen Landwirtschaft zu rechnen (IPCC, 2007b). Dies bedeutet, dass ein ungebremst voranschreitender Klimawandel den Druck auf die nutzbaren Agrarflächen deutlich erhöhen wird. Fast alle Projektionen gehen davon aus, dass die Weltmarktpreise für Getreide spätestens ab einer Erwärmung von 2°C steigen werden (z.B. Adams et al., 1995; Fischer et al., 2002, IPCC, 2007b).

5.2.5 Wirkungen des Bioenergiebooms auf die Ernährungssicherheit

Der Anbau von Biomasse für energetische Zwecke konkurriert mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion um Flächen und andere landwirtschaftliche Produktionsfaktoren. Durch die Nutzungsalternative Bioenergie steigen die Preise (unter sonst gleichen Bedingungen) für Agrarrohstoffe, damit werden Grundnahrungsmittel teurer (FAO, 2008c). Dies stellt eine Mehrbelastung für die Konsumenten dar, bietet aber den Bauern, die für den Markt produzieren Einkommensperspektiven. Die energetische Nutzung der Biomasse bzw. der Anbau von Energiepflanzen kann auch zur ländlichen Entwicklung beitragen, etwa durch eine verbesserte dezentrale Energieversorgung oder einkommensgenerierende Beschäftigungseffekte. Welche Gesamtwirkung zu erwarten ist, ist länder- und fallspezifisch unterschiedlich (Länderstudien: Kästen 4.1-2, 4.1-3, 5.2-2, 5.4-2, 6.7-2, 8.2-2, 8.2-4 und 10.8-1) und u.a. abhängig von den naturräumlichen, agrarwirtschaftlichen und sozialen Bedingungen, der Art der zu nutzenden Bioenergie sowie der Entwicklung der globalen Nahrungsmittelmärkte.

Tabelle 5.2-6
Aneignung der Nettoprimärproduktion natürlicher Ökosysteme durch den Menschen: Regionale Verteilung
Quelle: Haberl et al., 2007

Region	HANPP [%]
Nordafrika und westliches Asien	42
Afrika südlich der Sahara	18
Zentralasien und Russland	12
Ostasien	35
Südasien	63
Südostasien	30
Nordamerika	22
Lateinamerika und Karibik	16
Westeuropa	40
Südosteuropa	52
Ozeanien und Australien	11

5.2.5.1 Die vier Dimensionen der Ernährungssicherheit

In der FAO-Definition von Ernährungssicherheit werden die vier Dimensionen Verfügbarkeit, Zugang, Stabilität und Verwertbarkeit unterschieden (Faaji, 2008): Die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln bezieht sich auf die Fähigkeit eines Bio-ökologischen Systems ausreichend Nahrung zu produzieren. Mit Zugang zu Nahrungsmitteln sind die verfügungsrechtlichen Möglichkeiten von Haushalten angesprochen, insbesondere ihre Kaufkraft, um sich ausreichend mit Nahrung versorgen zu können. Mit Stabilität der Nahrungsmittelversorgung ist die zeitliche Dimension angesprochen, also ob die Versorgung durchgängig gesichert ist oder ob z.B. Preisvariabilität oder Produktionseinbußen die Versorgung temporär gefährden. Die Verwertbarkeit von Nah-

Kasten 5.2-1

Ist das Phosphatfördermaximum („peak phosphorus“) bereits überschritten?

Phosphor (P) ist neben Stickstoff (N) und Kalium (K) einer der drei Hauptbestandteile von Kunstdüngern, die daher stets nach ihren N-P-K-Anteilen gekennzeichnet sind. Während Stickstoff über das Haber-Bosch-Verfahren in praktisch unbegrenzten Mengen aus der Luft gewonnen werden kann, ist Phosphor eine endliche Ressource und kann nicht wie etwa Öl durch andere Energieträger oder Stoffe ersetzt werden. Phosphor ist als Nährstoff eine unersetzliche Grundlage für die angesichts einer wachsenden Weltbevölkerung notwendige Steigerung der Flächenproduktivität.

Déry und Anderson (2007) gehen davon aus, dass der globale Abbau von Phosphor, in der Regel als Phosphat, bereits 1989 sein Fördermaximum überschritten hat („peak phosphorus“). Wie aus der Debatte um das Fördermaximum für Öl („peak oil“) bekannt, beginnt das Problem nicht, wenn eine Ressource zu versiegen beginnt, sondern wenn das Fördermaximum erreicht wird. Von diesem Punkt an wird der Abbau schwieriger und teurer.

Im Gegensatz zu Öl können Phosphate aber „rückgewonnen“ werden. Daher muss eine der Antworten auf das Erreichen des Phosphatfördermaximums die Schließung von Nährstoffzyklen in der landwirtschaftlichen Produktion sein, insbesondere durch die Düngung der Agrarflächen mit organischem Dünger. Eine andere Möglichkeit ist die Rückgewinnung von Nährstoffen aus Klärschlamm sowie eine effizientere Anwendung von Dünger in der Landwirtschaft.

rung bezieht sich auf die Fähigkeit von Menschen die Nahrung physiologisch aufnehmen zu können, was eng mit den gesundheitlichen Bedingungen (v.a. Süßwasserqualität und generell dem Niveau der ländlichen Entwicklung) und der Art der Nahrungszubereitung verknüpft ist. Alle vier Dimensionen werden durch den Anbau von Energiepflanzen erheblich beeinflusst.

Die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln kann durch den Abzug produktiver Ressourcen wie Land, Wasser, Dünger usw. von der Nahrungs- und Futtermittelproduktion zum Anbau von Energiepflanzen gefährdet werden. Das Ausmaß dieser Konkurrenz ist stark abhängig von der Entwicklung der Flächenproduktivität in der Nahrungsproduktion, der Entwicklung des Fleischkonsums und dem Zeitpunkt der Einführung von Energiepflanzen der zweiten Generation. Letztere würden die Flächennutzungskonkurrenz mit Nahrungsmitteln deutlich mindern. Allerdings ist es bei der Ganzpflanzennutzung wichtig, dass genügend Biomasse zur Sicherung der Fertilität im Boden verbleibt. Besonders unter diesen Bedingungen könnte der Markt für Bioenergiepflanzen eine zusätzliche Möglichkeit zur Verbesserung der Einkommen bäuerlicher Haushalte bieten (Faaji, 2008). Aber auch die erste Generation der Biokraftstoffe hat in diesem Kontext unter bestimmten Bedingungen ein Potenzial, da die Verbesserung der Effizienz traditioneller Biomassenutzung generell zur Steigerung der Produktivität in der Landwirtschaft und anderer Sektoren beiträgt. Im Einzelfall muss geklärt werden, ob Nutzungskonflikte mit der Weidewirtschaft bestehen.

Gegenwärtig ist der mangelnde Zugang zu ausreichend Nahrung der Hauptgrund für Ernährungsunsicherheit. Diese würde zumindest kurzfristig zunehmen, wenn durch den globalen Ausbau der Bioenergieproduktion die realen Nahrungsmittelpreise stärker als die realen Einkommen stiegen. Bevölkerungsgruppen, die aufgrund mangelnder Kaufkraft oder fehlender Landnutzungsrechte bereits von Ernährungsunsicherheit betroffen bzw. dafür anfällig sind, würden zusätzlich gefährdet (Faaij, 2008). Der Ausbau von Energiepflanzen ist dabei ein wichtiger Faktor, der die Preise für Nahrungs- und Futtermittel mit nach oben treibt. Neben wichtigen Energiepflanzen wie Mais, Zucker, Palmöl, Raps und Soja haben die Preissteigerungen 2007 und 2008 auch die Futtermittelpreise und die Preise für Grundnahrungsmittel, wie Getreide deutlich erhöht (s.u.). Mit höheren Preisen für landwirtschaftliche Produkte könnte, abhängig von den lokalen Rahmenbedingungen, der ländliche Raum langfristig an Wirtschaftskraft und Einkommen gewinnen. Drei Viertel der Armen leben auf dem Land; sie können von steigenden Agrarpreisen profitieren, denn 80 % des Einkommens der ländlichen Bevölkerung kommen aus der Landwirtschaft (Brüntrup, 2008). Der Ausbau von Bioenergie könnte daher Entwicklungsmöglichkeiten verbessern helfen (Müller, 2008). Dann würde die Ernährungssicherheit steigen. Den langfristig möglichen positiven Einkommenseffekten für landwirtschaftliche Produzenten stehen kurzfristig negative Effekte für die auf Nahrungsmittel(zu)kauf angewiesenen Bevölkerungsteile gegenüber. Unruhen in zahlreichen Ländern verdeutlichen die Dramatik der sich aktuell zuspitzenden Preisentwicklung im Nahrungsmittelsektor (Konfliktkonstellation Nahrungsproduktion: WBGU, 2007).

Die Stabilität der Nahrungsmittelversorgung kann durch die Folgen von Wetterextremen, Turbulenzen auf den Märkten, Gewaltkonflikten oder Umweltdegradation temporär oder dauerhaft beeinträchtigt werden. Die zunehmende Kopplung der Agrar- und Energiemärkte kann zur Destabilisierung der Nahrungsmittelpreise betragen, da durch ihn die Preisvolatilität des Rohölmarkts direkter und stärker auf den Nahrungsmittelsektor übertragen wird (Faaij, 2008). Dadurch steigt das Risiko temporärer Ernährungsunsicherheit.

Auch die Verwertbarkeit von Nahrungsmitteln kann durch die Kultivierung von Energiepflanzen beeinträchtigt werden. Wenn z.B. der Ausbau von Energiepflanzen die Wasserverfügbarkeit und -qualität einschränkt, hat das negative Auswirkungen auf die Gesundheit der Betroffenen und verringert die Ernährungssicherheit, da kranke Menschen Nahrung schlechter verwerten können. Andererseits kann eine verbesserte Effizienz bei der traditionellen Biomassenutzung die gesundheitlichen Gefährdungspotenziale (Luftverschmutzung in Innenräumen, langes Holzsammeln) deutlich reduzieren helfen und Kochen billiger und sauberer machen und damit wesentlich zu einer Verbesserung der Ernährungslage und physiologischen Verwertbarkeit von Nahrung beitragen.

Nachfolgend werden die Einkommens- und Preiseffekte des Bioenergiebooms und deren Wirkungen auf die Ernährungssicherheit analysiert.

5.2.5.2 Der Einfluss des Bioenergiebooms auf Preise und Einkommen

Da Ernährungssicherheit größtenteils eine Verteilungsfrage und somit eine Frage der Kaufkraft ist, müssen zur Beurteilung der Ernährungssituation außer den Preis- auch die Einkommenseffekte eines Bioenergiebooms betrachtet werden. Individuelle Entscheidungen privater Landbesitzer über die Landnutzung werden vor allem dadurch bestimmt,

Abbildung 5.2-1
Zeitlicher Verlauf von Nahrungsmittel- und Ölpreisen seit 1980. Lebensmittelpreisindex 2005 = 100; enthalten sind: Getreide, Pflanzenöl, Fleisch, Fisch, Zucker, Bananen und Orangen sowie der Preisindex für Rohöl (2005 = 100). Quelle: Wiggins und Levy, 2008

welche Gewinne Erträge sich mit den einzelnen Landnutzungsformen erwirtschaften lassen. Soweit gesellschaftliche oder staatliche Regulierungen dem nicht entgegenstehen, wird in der Regel die Landnutzungsform praktiziert bzw. dasjenige Agrargut produziert, von dem sich der Besitzer den höchsten Gewinn erhofft. Der Gewinn hängt im Wesentlichen von den Kosten für Produktionsfaktoren, Vorprodukte (Düngemittel, Pflanzenschutz, Maschineneinsatz) und Vertrieb ab sowie von den Preisen für die in Frage kommenden Endprodukte. Steigt der Preis von Energiepflanzen gegenüber dem Preis von anderen Agrarprodukten in Folge einer steigenden Nachfrage nach Energiepflanzen, werden verstärkt Energiepflanzen angebaut und das Angebot an Nahrungs- und Futtermitteln geht zurück, so dass auch die Nahrungsmittelpreise ansteigen. Die Nachfrage und der Preis von Energiepflanzen ist wiederum u.a. abhängig von dem Preis für fossile Energieträger, die durch Bioenergie substituiert werden können, so dass etwa ein Anstieg der Ölpreise wiederum zu steigenden Nahrungsmittelpreisen führt (Abb. 5.2-1).

Allerdings müssen hier auch dynamische Effekte berücksichtigt werden. Durch steigende Ölpreise werden die fossilen Inputs in der Landwirtschaft teurer und damit auch die Biokraftstoffe, so dass sich der Preisvorteil von Bioenergie gegenüber Öl relativiert. Die hohen Preise für Rohöl, die 2008 für ein Barrel schon bei über 140 US-$ lagen (Abb. 5.2-1), und die derzeitigen Beimischungsquoten für Biotreibstoffe in den USA und der EU führen zurzeit zu einem verstärkten Einsatz von Getreide, Zucker und Palmöl zur Herstellung von Bio-Ethanol oder Bio-Diesel (Status Quo: Kap. 4.1). Das ist besonders problematisch für Entwicklungsländer, die Nahrungsmittel importieren und deren Handelsbilanz sich durch die gestiegenen Preise verschlechtert. Insbesondere ist das der Fall, wenn die durch den Anbau bzw. den Export von Biokraftstoffen erzielten Einnahmen nicht zum Erwerb von Nahrungsmitteln ausreichen bzw. wenn starke Preisfluktuationen stattfinden. Zwischen 2005 und 2008 sind die Nahrungsmittelpreise durchschnittlich um 83 % gestiegen (World Bank, 2008d). Weitere Steigerungen nicht zuletzt durch Bioenergie sind möglich. Sie schränken die Möglichkeiten für Konsumenten mit niedrigen Einkommen beim Kauf von Nahrungsmitteln weiter ein (Faaij, 2008).

Anteil des Biokraftstoffboom am Preisanstieg für Nahrungsmittel

Die Ursachen des Preisanstiegs im Nahrungsmittelsektor sind nur teilweise auf den Biokraftstoffboom zurückzuführen (Ressortarbeitsgruppe „Welternährungslage“, 2008; von Braun, 2008). Weitere Gründe sind, wie bereits ausgeführt, die weltweit wachsende Nachfrage nach Nahrungsmitteln, die sich ändernden Ernährungsgewohnheiten in den aufstrebenden Schwellenländern und das Wachstum der Weltbevölkerung. Auf der Angebotsseite haben die Produktionskosten bedingt durch höhere Inputpreise für Energie, Transport und Düngemittel, Wetterextreme wie Dürren und Überflutungen, den niedrigen Dollar, zu geringe Investitionen in die ländliche Infrastruktur und in die Landwirtschaft besonders in Entwicklungsländern und den Rückgang der Lagerhaltung bei den Nahrungsmitteln zugenommen. Auch Spekulation an den internationalen Rohstoffmärkten und die Abschottung von Märkten in Produzentenländern durch Exportzölle und Ausfuhrverbote, wie z.B. in Argentinien, Vietnam, China, Kambodscha kürzlich beobachtet, waren für die jüngsten Preisanstiege- und -fluktuationen verantwortlich. Abbildung 5.2-2 bietet einen Überblick über die Preisentwicklung bei Weizen, Reis und Mais seit 1990 (Wiggins und Levy, 2008).

Abbildung 5.2-2
Entwicklung der Getreidepreise zwischen 2000 und 2007.
Quelle: Wiggins und Levy, 2008

Wie hoch der Einfluss des Booms bei den Biokraftstoffen auf die Nahrungsmittelpreise ist, wird von verschiedenen Studien sehr unterschiedlich eingeschätzt: Während das US-Landwirtschaftsministerium beispielsweise lediglich von einem Einfluss von 2–3 % ausgeht (USDA, 2008), kommt ein – ebenso umstrittener – Bericht der Weltbank zu dem Schluss, dass Biokraftstoffe für 75 % der jüngsten Preisanstiege verantwortlich sind (Mitchell, 2008). IFPRI (2008) beziffert den Einfluss der gestiegenen Nachfrage nach Biokraftstoffen auf die durchschnittlichen Getreidepreise in den Jahren von 2000 bis 2007 auf 30 %, die OECD schätzt den Einfluss auf 5 % für, 7 % für Mais und 19 % für pflanzliche Öle (OECD, 2008). Auf dieser unsicheren Grundlage sind zukünftige Entwicklungen schwer abzuschätzen. Bei einem Ausbau der Bioenergieproduktion ist jedoch mit einem zunehmend steigenden Einfluss auf die Nahrungsmittelpreise zu rechnen. Auch der künftige Ölpreis wird einen starken Einfluss auf die Preisänderungen haben, da er die Nachfrage nach Biokraftstoffen erhöhen wird und damit die Nahrungsmittelversorgung weiter belastet (IFPRI, 2008). Zum Einfluss der Bioenergienutzung auf die Nahrungsmittelpreise besteht weiterhin Forschungsbedarf (Kap. 11.4.4).

Der starke Anstieg der Preise ist eine kurzfristige Reaktion. Mittelfristig werden die Märkte mit einer Ausweitung des Nahrungsmittelangebots reagieren, und die momentan hohen Preise werden voraussichtlich wieder sinken. Jedoch werden die Preise mittelfristig kaum auf das niedrige Niveau zu Beginn dieses Jahrtausends zurückkehren (Ressortarbeitsgruppe „Welternährungslage“, 2008). OECD und FAO schätzen, dass die Preise für landwirtschaftliche Güter nach den jetzt erreichten Rekordhöhen wieder sinken, jedoch in den nächsten 10 Jahren oberhalb des Durchschnittsniveaus der vergangenen Dekade liegen sowie sehr volatil bleiben werden (OECD und FAO, 2008). Aus Sicht des WBGU legen die beschriebenen globalen Trends (Kap. 5.2.2–5.2.4) nahe, dass diese Dynamik langfristig Bestand haben wird.

Auswirkungen des Preisanstiegs

Höhere Agrarpreise gelten langfristig als notwendig für die Armutsbekämpfung und Entwicklung besonders der ärmsten Entwicklungsländer (Constantin, 2008). Die Weltbank schätzt, dass im Jahr 2008 900 Mio. Menschen im ländlichen Raum der Entwicklungsländer von weniger als einem US-$/Tag leben, ein Großteil von ihnen ist in der Landwirtschaft tätig und könnte von steigenden Preisen profitieren (World Bank, 2008c). Bei den Auswirkungen des Preisanstiegs bei den Nahrungsmitteln muss zwischen der gesamt- und der einzelwirtschaftlichen Ebene sowie zwischen kurz- und langfristigen Folgen unterschieden werden.

Auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene werden zumindest kurzfristig Gewinne aus Preiserhöhungen eher in den Ländern anfallen, die über eine ausgebaute landwirtschaftliche Infrastruktur verfügen. Das sind vor allem kapitalintensive landwirtschaftliche Betriebe in Lateinamerika (Constantin, 2008). Netto-Importeure von Nahrungsmitteln und Energie werden dagegen besonders stark von Preissteigerungen betroffen sein. Die FAO nennt 22 Entwicklungsländer, die aufgrund einer Kombination eines hohen Niveaus von Unterernährung und einer starken Abhängigkeit von Ölimporten besonders verwundbar sind (Tab. 5.2-7). Die FAO schätzt, dass die Importrechnungen für Nahrungsmittel in Entwicklungsländern 2007 um 33 % gestiegen sind (FAO, 2008a). Ähnlich sieht es für die Gruppe der am wenigsten entwickelten Länder (LDCs) und die einkommensschwachen Entwicklungsländer, die Nettoimporteure von Lebensmitteln sind (LIFDCs). Der anhaltende

Starke Verlierer, Handelsbilanz verschlechtert sich mehr als 1% des BIP2005
Moderate Verlierer, Handelsbilanz verschlechtert sich weniger als 1% des BIP2005
Moderate Gewinner, Handelsbilanz verbessert sich weniger als 1% des BIP2005
Starke Gewinner, Handelsbilanz verbessert sich mehr als 1% des BIP2005
Keine Daten

Abbildung 5.2-3
Einfluss von prognostizierten Preisanstiegen bei Nahrungsmitteln (2007–2008) auf Handelsbilanzen.
Quelle: Maxwell, 2008

Anstieg der Ausgaben für importierte Nahrungsmittel dieser beiden Ländergruppen nimmt bedrohliche Ausmaße an: Die importierten Nahrungsmittel kosten heute mehr als das Doppelte als im Jahr 2000. Mit erwarteten 56 % ist der Anstieg der Importrechnung der LIFDCs für Getreide vom Geschäftsjahr 2006/2007 zum Geschäftsjahr 2007/2008 besonders hoch (FAO, 2008a). Es ergeben sich negative Auswirkungen auf die Handelsbilanzen von Ländern (Abb. 5.2-3).

Relativiert wird diese Bedrohung jedoch dadurch, dass vor allem in afrikanischen Ländern südlich der Sahara, die größtenteils zu den LIFDCs zählen, lokale und internationale Märkte aufgrund hoher Zölle auf Grundnahrungsmittel und hoher Transportkosten wenig miteinander verknüpft sind. Dadurch bleibt der Einfluss der hohen internationalen Weizen-, Mais- und Reispreise gering. Bis 2005 summierten sich die Getreideeinfuhren in Afrika südlich der Sahara auf 3,4 Mrd. US-$. Das entspricht einem halben Prozent des Bruttoinlandsprodukts der Region (Ng und Aksoy, 2008).

Langfristig führen die höheren Nahrungsmittelpreise auch in Ländern mit schwach ausgeprägter landwirtschaftlicher Infrastruktur zu einer Ausweitung des Angebots und damit zum Ausbau des landwirtschaftlichen Sektors, wodurch Wirtschaftskraft und Einkommen steigen können. Auch verbessern sich durch die gestiegenen Preise die Austauschbeziehungen zwischen Ländern (terms of trade) zugunsten agrarischer und agrarnaher (ländlicher) Sektoren, wodurch es zu positiven Entwicklungseffekten kommen kann.

Die gesamtwirtschaftliche Betrachtungsweise ist zur Beurteilung der Ernährungssicherheit in einem Land jedoch nicht ausreichend; auch die einzelwirtschaftliche Ebene muss betrachtet werden: Je höher das verfügbare Einkommen eines privaten Haushalts ist, desto mehr und höherwertige Nahrungsmittel kann er kaufen. Die Preise für Nahrungsmittel spielen hierbei eine wichtige Rolle, aber die Zusammenhänge zwischen Ernährungssicherheit und Nahrungsmittelpreisen sind sehr komplex. Zunächst einmal ist es wichtig, zwischen Netto-Produzenten und Netto-Konsumenten von Nahrungsmitteln (v.a. städtische Arme, Landlose, viele Subsistenzbauern) zu unterscheiden. Grundsätzlich ist es so, dass höhere Preise für Nahrungsmittel die Netto-Konsumenten stark treffen können, wie es heute schon beobachtet wird („Brotaufstände“, „Tortilla-Krise“). Andererseits können Landwirte, die Netto-Produzenten von Nahrungsmitteln sind, von den höheren Preisen profitieren und damit unter sonst gleichen Bedingungen ihre Einkommen erhöhen. Eine Voraussetzung ist

Tabelle 5.2-7
Länder mit hoher Ernährungsunsicherheit, die als Nettoimporteure von Öl und Getreide besonders Preisanstiegen ausgesetzt sind.
Quelle: FAO, 2008a

Länder	Petroleum-import [%]	Import wichtiger Getreise-sorten [%]	Unterer-nährung [%]
Eritrea	100	88	75
Burundi	100	12	66
Komoren	100	80	60
Tadschikistan	99	43	56
Sierra Leone	100	53	51
Liberia	100	62	50
Simbabwe	100	2	47
Äthiopien	100	22	46
Haiti	100	72	46
Sambia	100	4	46
Zentral-afrikanische Republik	100	25	44
Mosambik	100	20	44
Tanzania	100	14	44
Guinea-Bissau	100	55	39
Madagaskar	100	14	38
Malawi	100	1	35
Kambodscha	100	5	33
Korea	98	45	33
Ruanda	100	29	33
Botswana	100	76	32
Niger	100	82	32
Kenia	100	20	31

dabei, dass die Preiserhöhungen auch auf den lokalen Märkten ankommen und nicht durch nationale Preispolitiken und Transportkosten überkompensiert werden (Wiggins und Levy, 2008). Des Weiteren hängen die Gewinne der Kleinbauern durch gestiegene Lebensmittelpreise auch von deren Verteilung entlang der nationalen Wertschöpfungskette ab und davon, wie stark die Inputpreise im Verhältnis zu den Preisen für Nahrungsmittel gestiegen sind (Constantin, 2008).

Über den Netto-Effekt auf die Ernährungssicherheit können somit keine pauschalen Aussagen gemacht werden. Er hängt von den sozioökonomischen und agrarökologischen Bedingungen in einem Land und vom spezifischen Produkt, das vom Preisanstieg betroffen ist, ab. Beispielsweise können arme

Tabelle 5.2-8
Anteil an Haushalten, die in ausgewählten Ländern über das Subsistenzniveau hinaus produzieren (und damit Nettoverkäufer von Grundnahrungsmitteln sind).
Quelle: FAO, 2008a

	Anteil der Haushalte		
	Stadt	Land	Alle
Bangladesch, 2000	3,3	18,9	15,7
Pakistan, 2001	2,8	27,5	20,3
Vietnam, 1998	7,1	50,6	40,1
Guatemala, 2000	3,5	15,2	10,1
Ghana, 1998	13,8	43,5	32,6
Malawi, 2004	7,8	12,4	11,8
Madagaskar, 1993	14,4	59,2	50,8
Äthiopien, 2000	6,3	27,3	23,1
Zambia, 1998	2,8	29,6	19,1
Kambodscha, 1998	15,1	43,8	39,6
Bolivien, 2002	1,2	24,6	10,0
Peru, 2003	2,9	15,5	6,7
Maximum	15,1	59,2	50,8
Minimum	1,2	12,4	6,7
Ungewichteter Durchschnitt	6,8	30,7	23,3

Bauern in einem Entwicklungsland Netto-Verkäufer eines Gutes sein, dessen Preis gestiegen ist, und gleichzeitig Netto-Käufer eines Gutes, dessen Preis ebenfalls gestiegen ist (Faaij, 2008). Die folgende Tabelle schlüsselt für ausgewählte Länder aus drei wichtigen Entwicklungsregionen auf, wie hoch der Anteil an Netto-Verkäufern bzw. im Umkehrschluss Netto-Käufern von Grundnahrungsmitteln im Land ist (Tab. 5.2-8).

Wenn man den ungewichteten Durchschnitt zwischen den Ländern berechnet, ergibt sich, dass lediglich 23 % aller Haushalte und 31 % der ländlichen Haushalte Netto-Verkäufer von Nahrungsmitteln sind. Das bedeutet, dass der Grossteil der Haushalte in den betrachteten Ländern Netto-Käufer von Grundnahrungsmitteln sind und vermutlich negativ durch die hohen Nahrungsmittelpreise betroffen sind. Überproportional werden dabei die armen Haushalte sowohl im städtischen als auch im ländlichen Bereich betroffen sein (FAO, 2008a). Positive Auswirkungen auf der Haushaltsebene sowohl im ländlichen als auch im städtischen Raum ergeben sich langfristig durch die relativ hohe Arbeits-

Kasten 5.2-2

Länderstudie China – Nutzungskonkurrenz „Food vs. Fuel"

China ist mit 1,3 Mrd. Einwohnern das bevölkerungsreichste Land der Erde und derzeit nach den USA der zweitgrößte Energiekonsument der Welt. Bereits im nächsten Jahrzehnt wird das energiehungrige Schwellenland die USA im Energieverbrauch überholen. Im Jahr 2006 beanspruchte China ca. 15,6 % des weltweiten Primärenergieverbrauchs für sich – hauptsächlich aus fossilen Rohstoffen (BP, 2007). So wurden im Jahr 2005 ca. 70 % der Primärenergie aus Steinkohle sowie etwas mehr als 20 % aus Öl gewonnen. Da China nach den USA und Russland über die drittgrößten Kohlereserven der Welt verfügt, wird auch in Zukunft der größte Anteil der Energie aus Kohle gewonnen werden. Gas und Atomkraft spielen mit fast 3 % bzw. 1 % Anteil am Primärenergieverbrauch kaum eine Rolle. Dies gilt auch für die erneuerbaren Energien mit Ausnahme der Wasserkraft (ca. 5 % des Primärenergieverbrauchs) und Biomasse, was jedoch hauptsächlich auf die immer noch weit verbreitete traditionelle Biomassenutzung zurückzuführen ist (BP, 2007; GBEP, 2008).

Chinas Energiebedarf wird sich mit zunehmendem Wirtschafts- und damit verbundenem Wohlstandswachstum – bei Wachstumsraten des Energienachfrage von teilweise 15 % jährlich (GBEP, 2008) – bis zum Jahr 2030 trotz Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz mehr als verdoppeln. Dies hat seine Ursache nicht zuletzt im steigenden Verkehrsaufkommen (IEA, 2007d; Weyerhaeuser et al., 2007). China wird versuchen, den rasant steigenden Energiebedarf auch in Zukunft möglichst durch nationale Produktion zu decken. Mit Ausnahme von Öl ist dies möglich, da die Kohlevorräte groß sind und andere Potenziale wie etwa Wind- und Wasserkraft bei weitem nicht ausgeschöpft sind.

Die Versorgungslage bei der Stromerzeugung, welche zu 80 % auf Kohle und zu 16 % auf Wasserkraft basiert, ist strukturell bedingt sehr unterschiedlich und die Netzverluste sind hoch. Besonders ländliche Regionen sind mit Elektrizität unterversorgt. Die ländliche Stromversorgung beruht zu einem Großteil auf kleinen Wasserkraftwerken und auf traditioneller Biomassenutzung. Zur Verbesserung der ländlichen Energieversorgung wurden seit 1975 ca. 17 Mio. Biogasanlagen in ländlichen Regionen installiert, die mit biologischen Abfällen betrieben werden können (GTZ, 2006, 2007a). Aber auch bei der modernen Nutzung von Bioenergie ist China auf dem Vormarsch. Es gibt bereits einige Anlagen zur Stromproduktion aus Biomasse, die im Jahr 2006 insgesamt 2 GW Strom produzierten (REN21, 2008). Der Strom wurde hauptsächlich aus Bagasse gewonnen und diente in vielen Fällen der Zuckerindustrie zur Selbstversorgung. Darüber hinaus gibt es Produktionsanlagen für Bioethanol aus Getreide. Insgesamt ist China der weltweit größte Nutzer von Bioenergie (9 EJ im Jahr 2005) vor Indien, den USA und Brasilien (GBEP, 2008). Dabei nutzt das Land nur einen Bruchteil seines Bioenergiepotenzials. Möglichkeiten zur besseren Ausschöpfung des Potenzials bestehen vor allem bei der Nutzung von organischen Stoffen in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Dampfturbinen und bei der Verstromung von Biogas in Gasmotoren (GTZ, 2007a).

Offizielles Ziel der Regierung ist es, bis 2020 15 % der Primärenergie aus regenerativen Energien – ohne traditionelle Biomasse – zu erzeugen. Strom aus Biomasse soll einen Beitrag von 20 GW zur Erreichung des Ziels leisten (GBEP, 2008). Bis 2020 sollen außerdem 13 Mrd. Liter Bioethanol und 2,3 Mrd. l Biodiesel pro Jahr produziert werden, um die Importabhängigkeit von Rohöl zu reduzieren. China ist mit ca. 1–3 Mrd. l Bioethanol im Jahr 2006 der drittgrößte Ethanolproduzent nach den USA und Brasilien. Biodiesel wurde im Jahr 2006 in weitaus geringerem Umfang (etwa 70–100 Mio. l) produziert, vorwiegend aus Altöl (GBEP, 2008; REN21, 2008). Der Grossteil des Ethanols (über 80 %) wird aus Mais gewonnen, aber auch Maniok, Reis, Zucker und Zellstoffabfälle dienen als Rohstoffe. Für die Biodieselproduktion bieten sich neben Altöl noch Raps-, Sonnenblumen-, Soja- und Erdnussöl an (GTZ, 2006). Im Südwesten des Landes in den Provinzen Guizhou, Sichuan und Yunnan ist zudem der Anbau von *Jatropha* zur Biodieselerzeugung auf bis zu 15 Mio. Hektar geplant (Weyerhaeuser et al., 2007). Zusätzliche 3 Millionen Tonnen Biodiesel könnten künftig auch aus Altöl bzw. minderwertigen Nebenprodukten aus der Speiseölherstellung gewonnen werden, wobei kurzfristig nicht mit einer ausreichenden Logistik zur Nutzung dieser Rohstoffe zu rechnen ist (GTZ, 2006). Weiterhin plant China, künftig Biodiesel aus holzartiger Biomasse zu gewinnen (GBEP, 2008).

China ist das flächenmäßig viertgrößte Land der Erde. Allerdings sind nur 10 % der Landfläche landwirtschaftlich nutzbar. 27 % des Landes sind Wüsten und ein weiterer großer Teil sind marginale Bergregionen. Wälder machen 16,5 % des Landes aus. Die Desertifikation nimmt wegen Übernutzung stetig zu. Die Bewässerungseffizienz liegt in China noch immer bei 45 % im Vergleich zu 70 % in Industrieländern (GTZ, 2006). Daraus kann ein Konflikt der Bioenergieförderung mit der Nahrungsversorgung und der Wasserverfügbarkeit erwachsen. Momentan kann sich China noch selbst mit Getreide versorgen, könnte aber schon bald auf Importe angewiesen sein, wie es heute bereits bei Soja – aufgrund der steigenden Nachfrage nach Fleisch – der Fall ist. Vorrangiges Ziel Chinas ist deshalb auch in der Bioenergiepolitik die Nahrungsmittelsicherheit, da trotz gestiegener Produktivität die Nachfrage ansteigt und Versorgungsengpässe absehbar sind (GTZ, 2006).

Da die Getreidepreise in China *zuletzt* extrem gestiegen sind, hat die Regierung die Ethanolproduktion aus Getreide im Jahr 2007 verboten, um einen weiteren Anstieg der Getreidepreise zu verhindern (Weyerhaeuser et al., 2007). Stattdessen sollen neue Quellen für die Ethanolerzeugung genutzt werden, wie etwa Hirse, Maniok und Zellulose. Die Anstiege der Getreidepreise trugen jedoch auch zur Verbesserung landwirtschaftlicher Einkommen bei. Zudem wird angenommen, dass die energetische Nutzung von land- und forstwirtschaftlichen Produkten in China 9,2 Mio. Arbeitsplätzen schaffen könnte, was die Einkommenssituation der ländlichen Bevölkerung und deren Versorgung mit Nahrungsmitteln verbessern würde (GTZ, 2006). Gemäß Abschätzungen stehen für die Biokraftstoffproduktion zudem Landflächen zur Verfügung, die nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen. Für die Bioethanolproduktion sind in einem optimistischen Szenario 7,6 Mio. ha und für die Biodieselproduktion 67,5 Mio. ha Land geeignet (GTZ, 2006). Somit kann Bioenergie zumindest teilweise zur Deckung des steigenden Energiebedarfs in China beitragen. Die Nutzungskonkurrenz zwischen Bioenergie und Ernährungssicherheit muss jedoch sorgfältig beobachtet werden.

intensität des Agrarsektors in Entwicklungsländern und durch Verbindungen auf vor- und nachgelagerte Bereiche (Brüntrup, 2008).

5.2.6 Fazit: Ansätze zur Entschärfung der Nutzungskonkurrenzen

Die Nahrungsproduktion der kommenden Dekaden steht aufgrund der weltweit dynamisch wachsenden Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermitteln vor großen Herausforderungen. Haupttreiber dieser Entwicklung sind neben dem Bevölkerungswachstum, der wachsende Wohlstand in den wirtschaftlich aufstrebenden Entwicklungs- bzw. Schwellenländern. Die mit wachsendem Wohlstand einher gehende Änderung von Ernährungsgewohnheiten verleiht dieser Entwicklung eine ganz neue Dynamik. Gleichzeitig werden die Potenziale zur Steigerung der Nahrungsproduktion durch Flächenknappheit, Klimawandel und Bodendegradation einschränkt. Die wachsende Bedeutung der Bioenergie erhöht den Druck auf die landwirtschaftlichen Flächen zusätzlich. Vor diesem Hintergrund ist zu beachten, dass steigende Preise für Nahrungs- und Futtermittel sowie Energie eine Bedrohung der Ernährungssicherheit, aber auch eine Chance zu ihrer Reduzierung sein können. Entscheidend sind hier neben geeigneten politischen Rahmensetzungen die sozio-ökonomischen und agrarökologischen Bedingungen vor Ort. Wie mehrfach erwähnt, geht die Entwicklung der Weltmarktpreise für Nahrungsmittel auf ein ganzes Bündel von Ursachen zurück und ist nur begrenzt auf die weltweite Steigerung des Energiepflanzenanbaus zurückzuführen. Die „großen Hebel" zur Entschärfung der diskutierten Nutzungskonkurrenz mit Energiepflanzen sind global gesehen der bevorzugte Anbau von Energiepflanzen auf degradierten und marginalen Flächen (wenn die Flächen dem Lebensunterhalt lokaler Bevölkerungsgruppen dienen, müssen deren Interessen berücksichtigt werden), die Entwicklung integrierter Bioenergie- und Ernährungssicherungsstrategien auf Länderebene, die Steigerung der Flächenproduktivität, unterstützt durch eine Reform der internationalen Agrar- und Handelspolitik, sowie die Förderung fleischarmer Ernährungsweisen. In einigen armen Entwicklungsländern sind auch Maßnahmen zur Eindämmung des Bevölkerungswachstums sowie die Vermeidung von Nachernteverlusten relevant (Kap. 10.4). Die Empfehlungen in Kap. 12 tragen diesen Steuerungsmöglichkeiten Rechnung.

5.3 Stoffliche Nutzung von Biomasse

Biomasse aus Pflanzen und Tieren wird nicht nur für Nahrungs- und Futtermittel (Kap. 5.2) und zur Produktion von Bioenergie verwendet, sondern auch für die stoffliche Nutzung in Produkten. Dabei ist die stoffliche Nutzung von *pflanzlicher* Biomasse in Produkten außerordentlich vielfältig (Abb. 5.3-1) und regional sehr unterschiedlich. Aber auch Rohstoffe tierischer Herkunft werden stofflich genutzt, z.B. Häute bzw. Leder, Wolle oder Fette.

Mit Blick auf die Literatur zur stofflichen Nutzung von Biomasse fällt auf, dass meist nicht zwischen der Verwendung von „halmartiger" und „holzartiger" Biomasse unterschieden wird bzw. unterschieden werden kann. Im deutschsprachigen Raum werden pflanzliche Agrarrohstoffe und Rohhölzer in der stofflichen Nutzung unter dem Begriff Nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo) zusammengefasst: Das sind alle Stoffe, die aus lebender Materie stammen und vom Menschen zielgerichtet für Zwecke außerhalb des Nahrungs- und Futterbereiches verwendet werden (FNR, 2006c).

Produkte, die aus Biomasse hergestellt werden (wie z.B. Bio-Kunststoffe oder Seifen), sind – über die gesamte Produktlinie betrachtet – nicht immer mit weniger CO_2-Emissionen verbunden als erdölbasierte Produkte. Durch direkte oder indirekte Landnutzungsänderungen beim Anbau oder durch eine energetisch aufwendige Verarbeitung können im Einzelfall mehr Treibhausgase freigesetzt werden als bei erdölbasierten Produkten.

Für den Anteil der Biomasse in der stofflichen Nutzung und entsprechend eingesetzter Flächen gibt es bisher keine globale Erfassung. Selbst vorhandene Daten zur Produktion oder zum Verbrauch einzelner stofflicher Nutzungen sind vielfach unklar oder widersprüchlich. Dies liegt daran, dass oft nicht eindeutig zwischen stofflicher und energetischer Nutzung oder der Nutzung fossiler und biogener Quellen unterschieden wird, und viele Produkte gleichzeitig Rohstoffe aus mineralischen, biogenen und fossilen Quellen enthalten (z.B. Waschmittel). Weiter wird oft nicht klar zwischen primären und sekundären (Recycling-)Rohstoffen unterschieden, und weiterverarbeitete Holzprodukte werden nicht immer einbezogen. Darüber hinaus gibt es einen regen Handel mit Rohstoffen, halbfertigen Produkten und Produkten, wodurch die Abgrenzung der Daten zusätzlich erschwert wird. So ist beispielsweise Deutschland für bestimmte verarbeitete Baumwoll-Halbwaren ein Netto-Exporteur.

Abbildung 5.3-1
Nutzungsketten zur stofflichen Biomassenutzung.
Quelle: SRU, 2007 vom WBGU ergänzt

5.3.1 Stoffliche Nutzung von pflanzlichen Rohstoffen (außer Holz) in Deutschland

Für die Ermittlung von Flächenpotenzialen für die energetische Biomassenutzung ist es wichtig, zumindest die Größenordnung der stofflichen Nutzung von Biomasse zu kennen. Nachfolgend wird eine solche Abschätzung vorgenommen, wobei zwischen Holz- und Zellstoffprodukten aus Waldflächen sowie pflanzlichen und tierischen Produkten aus Acker- und Grasland unterschieden wird. Da keine Studien zur globalen Flächeninanspruchnahme der stofflichen Nutzung von Biomasse vorliegen, wird der Umfang der Nutzung zuerst am Beispiel eines Industrielands (Deutschlands) erhoben und dann unter vereinfachenden Annahmen auf den globalen Bedarf skaliert. Rohstoffe tierischer Herkunft (z.B. tierische Fette, Leder, Wolle) werden dabei nicht einberechnet.

Die Abschätzung des Flächenbedarfs wird an Hand der mengenmäßig wichtigsten Rohstoffe durchgeführt, das sind Holz/Zellulose, Naturfasern, Öle und Fette, Stärke und Zucker (TAB, 2007). Weitere Rohstoffe werden mit einem Pauschalbetrag erfasst. Auch die Zahlen zum Pro-Kopf-Verbrauch der wichtigsten Rohstoffe sind nicht einfach abzuleiten, da bei Import und Export von Halbwaren der Anteil der biogenen Rohstoffe selten angegeben wird.

So werden in Deutschland nach Angaben des Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag – TAB (2007) jährlich etwa 120.000 t Naturfasern industriell verarbeitet (etwa 1,45 kg/Kopf). Der jährliche Pro-Kopf-Verbrauch dürfte allein bei Baumwolle bei etwa 10 kg/Kopf und der Gesamtverbrauch in Deutschland damit insgesamt bei 825.000 t liegen. Zum stofflichen Pro-Kopf-Verbrauch von (verarbeiteten) Ölen, Fetten, Stärke und Zucker in Produkten gibt es keine statistischen Erhebungen, so dass zur Abschätzung des Verbrauchs vereinfacht davon ausgegangen wird, dass dieser so hoch ist wie die in Deutschland jeweils jährlich verarbeitete Menge: 805.000 t pflanzliche Öle, 345.000 t tierische Fette, 492.000 t Chemiestärke und 240.000 t Zucker (TAB, 2007). Sonstige pflanzliche Rohstoffe wie etwa Heilmittel sind im Vergleich dazu mengenmäßig zu vernachlässigen (der Flächenbedarf könnte allerdings vergleichsweise höher sein).

Die Anbaufläche für NaWaRo (stoffliche und energetische Nutzung) in Deutschland lag 2005 bei 1,4 Mio. ha (von insgesamt 17 Mio. Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche bzw. 12 Mio. Hektar Ackerfläche und 5 Mio ha. Grünland). Nach Angaben des TAB wurden davon auf nur 0,28 Mio. ha NaWaRo für die stoffliche Nutzung produziert (0,23 % der Ackerfläche). Die für die stoffliche Nutzung der

in Deutschland verbrauchten Produkte tatsächlich genutzte Fläche dürfte um ein Vielfaches höher sein, wenn man die Flächennutzung im Ausland einbezieht (z.B. bei Baumwolle und tropischen Ölen) und noch höher, wenn man zusätzlich alle jährlich verbrauchten Kunststoffe, Bitumen und Schmierstoffe aus Biomasse herstellen würde. Bei einem jährlichen deutschen Pro-Kopf-Verbrauch von rund 10 kg Baumwolle ergibt sich beispielsweise bereits eine Ackeranbaufläche von fast 1,2 Mio. ha (10 % der deutschen Ackerfläche). Weltweit liegt der Anteil des Baumwollanbaus bei rund 2,5 % der Ackerfläche.

Kunststoffe werden bislang fast ausschließlich aus Öl und Gas produziert, der Anteil von Biokunststoffen an der Gesamtproduktion liegt unter 1 %. Wenn man in ferner Zukunft alle Kunststoffe sowie Bitumen und Schmierstoffe (zusammen etwa 8 % des Rohölverbrauchs) aus biogenen Rohstoffen herstellen würde, ergäbe sich ein sehr hoher Flächenverbrauch. Bei einem halb so hohen Pro-Kopf-Verbrauch wie derzeit in Deutschland und einer Weltbevölkerung von 9 Mrd. Menschen würde der Flächenbedarf für Produkte aus traditionell landwirtschaftlicher Erzeugung (Textilien, chemische Produkte aus Ölen, Zucker und Stärke) und für die biogene Erzeugung von Kunststoffen, Bitumen und Schmierstoffen nach Berechnung des WBGU zusammen bei rund 10 % der Weltagrarfläche liegen.

5.3.2 Stoffliche Nutzung von Forstprodukten

Die globale Waldfläche betrug 2005 weniger als 4 Mrd. Hektar. Diese Fläche ist rückläufig, auch wenn sich regional unterschiedliche Entwicklungen darstellen. Während für Teile Europas und Asien aufgrund von Aufforstungen Nettozuwächse an Waldfläche berichtet werden, nehmen die Flächen in anderen Regionen, vor allem in Afrika oder Lateinamerika weiter ab (FAO, 2005).

Waldökosysteme stellen verschiedene Dienstleistungen gebündelt bereit und werden daher häufig in multiplen Verwendungen genutzt, d.h. eine Waldfläche kann für unterschiedliche Zwecke gleichzeitig genutzt werden. In 34 % der Wälder ist die Produktion von Holzprodukten und nichtholzartigen Forstprodukten die primäre Nutzungsform. Insgesamt werden über 50 % der Wälder produktiv in Verbindung mit anderen Ökosystemleistungen, wie Bodenschutz und Wasserschutz, Naturschutz oder Erholung genutzt (FAO, 2005). Strukturell gewinnen Holzplantagen an Bedeutung.

Für 2005 wurde die weltweite Entnahme von Holz auf rund 4 Mrd. m^3 taxiert. Die weltweit produzierte Holzmenge ist damit deutlich höher als die Gesamtmenge der Werkstoffe Stahl, Aluminium und Beton. Nach Angaben der FAO werden 44 % des eingeschlagenen Holzes als Brennholz verwendet (FAO, 2005). 56 % werden für Rund- und Industrieholz (daraus u.a. Zellstoffprodukte), Schnittholz sowie Fertigwaren (z.B. Möbel), also zunächst für stoffliche Zwecke, eingesetzt. Bei der Verarbeitung werden allerdings oft in der Produktion anfallende Holzabfälle energetisch genutzt, so dass der tatsächlich stofflich genutzte Anteil etwas niedriger als 56 % liegen dürfte.

Brennholz wird bislang kaum international gehandelt und in großem Ausmaß traditionell zum Heizen und Kochen eingesetzt. Hohe Transportkosten relativ zum Warenwert verhindern die Wirtschaftlichkeit von Exporten (Thrän et al., 2005). Für Holz-Pellets findet allerdings schon heute ein Handel statt, der in Zukunft noch stark zunehmen könnte. Zwischen der energetischen und stofflichen Nutzung von Holz gibt es dann eine Konkurrenz, wenn das Holz sofort energetisch genutzt wird. Bei der stofflichen Nutzung können die Holzprodukte bis auf wenige Aus-

Tabelle 5.3-1
Produktion und Welthandel mit Forstprodukten. Handelsdaten sind jeweils der Mittelwert von Import und Export aus offiziellen Statistiken.
Quelle: FAO, 2007a

	Globale Produktion (2005) [Mio. m^3]	Handel (2005) [Mio. m^3]	Anteil Handel an der Produktion [%]
Brennholz	1.766,9	3,6	0,2
Rund- und Industrieholz	1.644,3	120,8	7,3
Schnittholz	421,8	132,2	31,3
Holzwerkstoffe	220,1	79,1	36,0
	[Mio. t]	**[Mio. t]**	**[%]**
Zellstoff	*189,7*	*41,0*	21,9
Papier und Karton	*353,4*	*111,8*	31,6

Abbildung 5.3-2
Handel mit Forstprodukten – Regionale Trends seit 1990.
Quelle: FAO, 2007a

nahmen (wie etwa Toilettenpapier) nach Ende ihrer Nutzungsphase energetisch verwertet werden (Kaskadennutzung: Kap. 5.3.3).

Der Handel mit Industrie- und Rundhölzern ist schwer abzugrenzen, da ein Teil verarbeitet und dann als Zellstoff oder Papier exportiert wird. Hauptexporteure von Hölzern sind die Russische Förderation, Kanada und die USA (Thrän et al., 2005). Europa und Asien sind die Hauptabnehmer der russischen Hölzer (FAO, 2007a). Der interne Handel in Europa und Nordamerika macht den Großteil des weltweiten Handelsvolumens aus (Thrän et al., 2005).

Bei zum Heizen und Kochen eingesetztem Brennholz besteht vor allem in Entwicklungsländern ein hohes Einsparpotenzial, weil dort oft noch auf offenem Feuer gekocht wird (Kap. 8.2). Andererseits könnte durch Zunahme der Bevölkerung und steigende Energiepreise für alternative Brennstoffe die Nachfrage steigen. Bei stofflich genutztem Holz (Zellstoffprodukte wie z.B. Papier, Bauholz, Möbelholz) muss mit einer deutlichen Steigerung der Nachfrage gerechnet werden. Im European Forest Sector Outlook der UN wird beispielsweise für Europa (das schon einen sehr hohen Verbrauch hat) von 2000 bis 2020 eine weitere jährliche Zunahme des Holzverbrauchs prognostiziert: um 1,8 % bei Schnittholz, 2,6 % für Panels und 2,9 % für Papierprodukte (UNECE, 2005).

Etwa ein Fünftel der Holzproduktion wird für die Papierproduktion eingesetzt (Worldwatch Institute, 1999). Der Pro-Kopf-Verbrauch der stofflich genutzten Holzprodukte ist in den Industrieländern erheblich höher als in Schwellen- und Entwicklungsländern, bei Papierprodukten etwa zwölfmal so hoch. 15 % der Weltbevölkerung haben einen Pro-Kopf-Verbrauch von 240 kg Papier pro Kopf und Jahr, 85 % einen Pro-Kopf-Verbrauch von 19 kg (Edelbrock, 2005). Der Weltdurchschnitt liegt bei 57 kg pro Kopf. Bei einer Verdopplung des Weltdurchschnitts auf 114 kg/Kopf, einer Recyclingquote von 50 % und einer Weltbevölkerung von 9 Milliarden würde sich allein durch den gestiegenen Papierverbrauch ein zusätzlicher Rohholzbedarf von rund 1 Mrd. m^3 Rohholz ergeben (rund 25 % der derzeitigen stofflichen und energetischen Nutzung), bei einer Steigerung auf den Pro-Kopf-Verbrauch Deutschlands wären das rund 2,7 Mrd. m^3 Rohholz (rund 70 % der derzeitigen stofflichen und energetischen Nutzung).

Vor allem durch die hohen Zellstoffimporte haben selbst waldreiche Industrieländer wie etwa Deutschland einen hohen Importanteil an Holzprodukten und an globaler Inanspruchnahme von Waldflächen. So wird die globale Flächeninanspruchnahme für Holzprodukte durch die Verwendung von Holzprodukten in Deutschland auf 23,3 Mio. ha geschätzt. Die nationale Waldfläche von 10,1 Mio. ha hat daran nur einen Anteil von 43 % (Wuppertal-Institut und RWI, 2008).

5.3.3 Kaskaden-Nutzung

Für die Produktion von Biomasse für stoffliche Zwecke (Fasern, Kunststoffe, technische Öle u.a.) dürfte der Anteil an der Agrarfläche bei rund liegen (s.o.). Dieser durchaus relevante Flächenbedarf würde sich dadurch relativieren, dass die auf Biomasse basierenden Produkte nach ihrer Nutzung einer energetischen Verwertung zugeführt werden können („Kaskadennutzung“). Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass es bei der Produktion, bei der Nutzung in offenen oder halboffenen Anwendungen (z.B. Waschmittel) sowie bei Sammeln und Recycling zu Energieverlusten kommt.

5.3.4
Perspektiven der stofflichen Produktion ohne Öl, Gas und Kohle

Bereits heute werden Rohstoffe wie Fasern, technische Öle u.a. ausschließlich oder teilweise durch Anbau von Pflanzen gewonnen. Allerdings werden die mengenmäßig wichtiger Produkte (wie z.B. die Kunststoffe) überwiegend aus Erdöl hergestellt. Bei einem kompletten Ausstieg aus fossilen Energieträgern müssten auch diese Produkte aus Biomasse hergestellt werden. Langfristig wird sich die stoffliche Produktion damit komplett anders als heute darstellen:

- Ein gezielter Anbau von Pflanzen sollte dazu führen, dass soweit wie möglich Rohstoffe produziert werden können, die bereits einen hohen natürlichen Veredelungsgrad aufweisen, wie z.B. bereits heute die so genannten „Naturstoffe“ (Arzneimittel, Duftstoffe, Seifenrohstoffe usw.)
- Der Großteil der Rohstoffe sollte in Bio-„Raffinerien“ (z.B. in LCF-Bioraffinerien) erzeugt werden, wobei ähnlich wie heute in der Petrochemie einige typische Grundstoffe synthetisiert werden könnten, aus denen sich „Stammbäume“ von weiter verarbeiteten Rohstoffen bzw. Chemikalien biogenen Ursprungs ergeben würden (TAB, 2007; IFEU, 2007). Wesentliche Grundstoffe würden sich von Kohlehydraten bzw. Lignozellulose ableiten. Die Produktion könnte, aber müsste nicht, mit der von Biokraftstoffen gekoppelt sein.
- Wie im Energiebereich müsste auch im stofflichen Bereich auf Effizienz geachtet werden. Produktdesign und Abfallwirtschaft müssen stark umgestellt werden, so dass sich ohne hohen Aufwand zur Sammlung und Aufbereitung der Produkte hohe stoffliche und energetische Verwertungsquoten ergeben.

5.4
Nutzungskonkurrenz zur biologischen Vielfalt

Die biologische Vielfalt der Erde ist in der Krise: die heutige Aussterberate der Tier- und Pflanzenarten ist 100–1.000mal größer als im Mittel der Erdgeschichte und wird sich weiter erhöhen (MA, 2005a). Durch den Verlust der biologischen Vielfalt sind wichtige Ökosystemleistungen gefährdet (z.B. Küstenschutz, Wasserhaushalt, Bestäubung, usw.; MA, 2005e). Außerdem gehen mit dem Aussterben von Tier- und Pflanzenarten ihre genetischen und physiologischen Baupläne irreversibel verloren, die für künftige Entwicklungsoptionen von großem Wert sein können, z.B. die Weiterentwicklung der Nutzpflanzen oder die Medizinforschung (WBGU, 2000; Chivian und Bernstein, 2008). Biodiversität ist aus diesen Gründen als ein Schlüsselelement für nachhaltige Entwicklung anerkannt (WEHAB-Framework des WSSD; WEHAB Working Group, 2002). Die Weltgemeinschaft hat sich im Rahmen der Biodiversitätskonvention (CBD, 2002b) und auf dem Weltgipfel für Nachhaltige Entwicklung (WSSD, 2002) darauf geeinigt, bis 2010 einen signifikanten Rückgang der Verlustrate der biologischen Vielfalt zu erreichen (Kap. 3 und 10.5). Allerdings deutet vieles darauf hin, dass dieses Ziel verfehlt wird (MA, 2005a): Von den 15 Indikatoren, die von der Biodiversitätskonvention verwendet werden um die Erreichung des 2010-Ziels zu beurteilen, zeigen 12 Indikatoren einen ungebrochenen Abwärtstrend. Nur ein Indikator zeigt nach oben, nämlich die Fläche der ausgewiesenen Schutzgebiete (CBD, 2006a; Kasten 5.4-1).

Der wichtigste Grund für die aktuelle globale Krise der biologischen Vielfalt ist der Habitatverlust durch die land- und forstwirtschaftlich motivierte Konversion natürlicher und naturnaher Ökosysteme (Kap. 4.2.3) sowie durch die intensive Nutzung dieser Produktionssysteme. Mit dem Anbau von Bioenergiepflanzen kommt ein zusätzlicher Landnutzungstyp hinzu, was die Konkurrenz um nutzbares Land verschärfen kann. Die zunehmende Konkurrenz um Land, und damit die Gefahr, biologische Vielfalt zusätzlich erheblich zu reduzieren (UNEP, 2007a), hat vor allem zwei Dimensionen: Die Konversion natürlicher Ökosysteme sowie die Intensivierung der Land- und Forstwirtschaft auf bestehenden Flächen. Konversion natürlicher Ökosysteme kann auch indirekt stattfinden, wenn der Anbau von Bioenergie die dort bislang stattgefundene Landnutzung verdrängt. Diese muss auf andere Flächen ausweichen, was dazu führen kann, das hierfür natürliche Ökosysteme konvertiert werden (Searchinger et al., 2008). Diese indirekten Verdrängungseffekte haben häufig eine internationale Dimension: Eine Ausweitung des Bioenergieanbaus auf Ackerflächen in Deutschland kann dazu führen, dass über internationale Grenzen hinweg beispielsweise in tropischen Ländern verstärkt Regenwald gerodet oder Savanne umgebrochen wird.

Die grundlegende Analyse dieser Landnutzungskonkurrenz wird dadurch erschwert, dass die wissenschaftliche Untersuchung der Zusammenhänge zwischen einer stark ausgeweiteten Bioenergienutzung und den ökosystemaren Wirkungen erst seit kurzem an Dynamik gewinnt (Fritsche et al., 2006). So erwähnt z.B. der umfassende Bericht des Millennium Ecosystem Assessment das Problem Bioenergie nur am Rande (MA, 2005a, b, c, d), während drei Jahre später in einer Umfrage unter britischen Naturschutzexperten die Gefahren des zunehmenden Bedarfs nach Bioenergie als ein hohes Risiko für

Kasten 5.4-1

Schutzgebiete: Status Quo und Trends

Der Weltnaturschutzverband IUCN definiert Schutzgebiete folgendermaßen: „A clearly defined geographical space, recognised, dedicated and managed, through legal or other effective means, to achieve the long-term conservation of nature with associated ecosystem services and cultural values“ (Dudley, 2008). Schutzgebiete haben in den letzten Jahrzehnten sowohl an Anzahl als auch an Fläche deutlich zugenommen (Abb. 5.4-1). Es gibt heute etwa 115.000 Schutzgebiete weltweit (WDPA, 2008), mit einer Fläche von über 20 Mio. km², was mehr als 12 % der terrestrischen Fläche entspricht (Chape et al., 2005). Dabei werden auch Gebiete mitgerechnet, deren primärer Zweck die nachhaltige Nutzung und nicht die Erhaltung biologischer Vielfalt ist (IUCN-Kategorien V und VI; UNEP-WCMC, 2008).

Allerdings können Anzahl und Fläche der Schutzgebiete nur mit Abstrichen als Indikatoren für effektiven Naturschutz dienen (Pressey, 1997), da viele der Schutzgebiete nur auf dem Papier existieren (IUCN, 2003), und es bei vielen Gebieten an effektivem Management und Durchsetzung des Schutzstatus mangelt (UNEP, 2007a; Dudley et al., 2004). Zudem erfolgt die Auswahl der Gebiete meist nicht nach wissenschaftlichen Erwägungen, wie der größtmögliche Beitrag zum globalen Schutzgebietssystem erreicht werden kann, sondern es werden häufig ökonomisch weniger interessante Flächen bevorzugt unter Schutz gestellt.

Wirksamkeit und Gefährdung

Vor allem in den Tropen sind Schutzgebiete bedroht, primär durch Übernutzung (Jagd, Sammeln) und Besiedlungsdruck, durch Landkonversion und -fragmentierung innerhalb der Gebiete sowie durch die zunehmende Isolierung der Schutzgebiete als Folge der Landkonversion der umliegenden Flächen (Carey et al., 2000; IUCN, 2003). Hinzu kommen die Bedrohungen durch invasive Arten (Kasten 5.4-3) und den Klimawandel (Kap. 5.4.4). Eine Untersuchung in zehn tropischen Ländern zeigte, dass nur 1 % der dortigen Waldschutzgebiete als gesichert gelten konnten und viele unter Degradation und Flächenverlust litten (Dudley und Stolton, 1999b). Im Gegensatz dazu konnte in der Mehrzahl der von Bruner et al. (2001) untersuchten tropischen Schutzgebiete weitere Landrodung verhindert und andere schädliche Aktivitäten zumindest begrenzt werden. Je besser die Gebiete finanziell und mit Managementkapazität ausgestattet waren und geführt wurden, desto effektiver konnte in ihnen die biologische Vielfalt geschützt werden (IUCN, 2003). Insbesondere Schutzgebiete in Ländern mit schwachen Governance-Strukturen und geringen Kapazitäten zum Management bestehender Schutzgebiete sind gefährdet (Brandon et al., 1998). Angesichts des zunehmenden Landnutzungsdrucks können auch viele bestehende Schutzgebiete eine Erosion der biologischen Vielfalt ohne zusätzliche Investitionen voraussichtlich nicht aufhalten.

Abbildung 5.4-1
Zunahme der Schutzgebietsfläche weltweit. Der geschützte Anteil an der terrestrischen Fläche hat in den letzten Jahrzehnten flächenmäßig deutlich zugenommen und liegt heute bei mehr als 12 %.
Quelle: UNEP, 2007a

Abbildung 5.4-2
Repräsentativität von Ökoregionen im bestehenden Schutzgebietssystem. Häufigkeitsverteilung der 825 terrestrischen Ökoregionen nach Anteil der Schutzfläche. In weniger als der Hälfte der Ökoregionen stehen mehr als 10 % der Fläche unter Schutz und in 140 Ökoregionen sind weniger als 1 % der Fläche geschützt.
Quelle: UNEP, 2007a

Repräsentativität

In welchem Ausmaß biologische Vielfalt im bestehenden globalen Schutzgebietssystem geschützt wird, ist nicht genau bekannt. Bei Vögeln läßt sich aber feststellen, dass 20 % der Arten in keinem Schutzgebiet vorkommen (Rodrigues et al., 2004). Wenn man die vom WWF entwickelten 825 Ökoregionen (Olson et al., 2001) mit den bestehenden Schutzgebieten abgleicht (Abb. 5.4-2), so stehen weniger als die Hälfte der Ökoregionen zu mehr als 10 % der Fläche unter Schutz, und in 140 Ökoregionen sind weniger als 1 % der Fläche geschützt (CBD, 2006a). Die für die menschliche Ernährungssicherung besonders wichtige genetische Vielfalt der Kulturpflanzen und ihre Diversitätszentren sind in den bestehenden Schutzgebieten deutlich unterrepräsentiert (Stolton et al., 2006). Die Repräsentativität des Schutzsystems ist also weder für Ökosystemtypen noch für Arten oder genetische Vielfalt ausreichend.

Klimawandel

Der Klimawandel muss künftig bei der Planung und Führung von Schutzgebieten berücksichtigt werden, denn etwa die Hälfte der Schutzgebiete kann von Verschiebungen der Klimazonen betroffen sein (Halpin, 1997). Ein Schutzgebietssystem, das an den Klimawandel angepasst sein soll, muss daher flexibler, größer, besser vernetzt und besser in die umliegende Kulturlandschaft integriert sein (UNEP, 2007a; Hannah et al., 2007).

Insgesamt ist also das bestehende Schutzgebietssystem ein notwendiges, aber nicht hinreichendes Instrument, um den weiteren Verlust der biologischen Vielfalt zu verhindern (MA, 2005c; McNeely, 2008). Es gibt international einen breiten Konsens darüber, dass das bestehende globale Schutzgebietsnetzwerk ausgeweitet und besser finanziert werden muss, wenn es seinen Zweck erfüllen soll (Kap.

10.5). Die bestehenden Schutzgebietssysteme sind weder groß genug oder gut genug geplant, noch gut genug geführt (CBD, 2004b). Zur notwendigen Ausweitung gehören u. a Korridore zur Vernetzung der Schutzgebiete, zusätzliche Schutzgebiete in Ökosystemtypen oder Ökoregionen, in denen der Schutz noch unterrepräsentiert ist, Flächen, die für den Schutz gefährdeter Arten oder genetischer Vielfalt wichtig sind, sowie Pufferzonen zu den intensiv bewirtschafteten Flächen. Diese Komplettierung des terrestrischen Schutzgebietsnetzwerks soll laut Biodiversitätskonvention bis 2010 abgeschlossen sein – nicht zuletzt angesichts des zu erwarteten zunehmenden Drucks auf die Landnutzung ist dies ein sehr ambitioniertes Ziel, das stärkerer politischer Unterstützung und institutioneller Verbesserungen bedarf (CBD, 2004b; Kap. 10.5).

den weiteren Verlust naturnaher Habitate und biologischer Vielfalt eingestuft wurden (Sutherland et al., 2008).

5.4.1 Konkurrenz des Energiepflanzenanbaus mit bestehenden Schutzgebieten

Der Anbau von Energiepflanzen kann direkt mit der Erhaltung biologischer Vielfalt in Konkurrenz stehen, wenn hierfür die Konversion von Flächen bestehender Schutzgebiete vorgesehen wird. Da Schutzgebiete eines der wichtigsten Instrumente für die Erhaltung der biologischen Vielfalt und für die Sicherung von Ökosystemleistungen sind (Kasten 5.4-1; CBD, 2004b; MA, 2005c), sollte der Schutzstatus andere, meist degradierende Nutzungen weitgehend ausschließen.

Dies ist jedoch nicht immer der Fall. Schon die traditionellen Formen der Bioenergienutzung (Feuerholz, Holzkohle) können in Konkurrenz mit Schutzgebieten stehen, wenn die Interessen der lokalen Bevölkerung am Zugang zu diesen biologischen Ressourcen mit dem Naturschutzzweck kollidieren. Diese Konflikte mit traditioneller Nutzung sind durch geeignete Planung und Partizipation aber in der Regel lösbar (MA, 2005c).

Konfliktträchtiger sind großskalige, moderne Bioenergieprojekte. In Äthiopien wurden z.B. große Landflächen für die Produktion von Rizinus für Biodiesel gerodet, die sich direkt am Babile-Reservat befanden, einem Schutzgebiet für Elefanten. Aber auch für die direkte Konkurrenz durch Ausdehnung von Anbauflächen für Energiepflanzen in Schutzgebiete hinein gibt es Beispiele. So wurden in Uganda Pläne, über 7.000 ha eines Schutzgebiets mit tropischem Regenwald (Mabira Forest) für die Entwicklung von Zuckerrohrplantagen umzuwidmen, erst nach vehementen Protesten der Bevölkerung gestoppt (ABN, 2007). Ein weiteres Beispiel ist die indonesische Provinz Riau, die in den letzten 25 Jahren 65 % der natürlichen Waldfläche verloren hat und die immer noch sehr hohe Raten an Rodung und Degradation aufweist (2005–2006: 11 % Verlust). Als Folgenutzung werden häufig Ölpalmen oder Akazienplantagen angelegt. Aber auch innerhalb der Schutzgebiete konnte die Entwaldung nicht verhindert werden, selbst wenn die Raten deutlich niedriger waren als in den Flächen außerhalb. Die in Riau lokal verwalteten Schutzgebiete (etwa 22 % der Fläche) erwiesen sich dabei als deutlich weniger effektiv (Rückgang der Primärwaldfläche von 81 % auf 47 %) als die nationalen Gebiete (6 % der Fläche, Rückgang von 90 % auf 70 %; Uryu et al., 2008).

Neben der direkten Konkurrenz zu Bioenergieplantagen müssen auch die indirekten Effekte berücksichtigt werden, da die vom Bioenergieanbau verdrängte Landnutzung den Druck auf bestehende Schutzgebiete erhöhen kann. Dies ist besonders für die Schutzgebiete in den Tropen relevant, die schon heute unter ständiger Gefährdung stehen (Carey et al., 2000; IUCN, 2003; Kasten 5.4-1).

Es existieren aber auch Potenziale für eine nachhaltige Nutzung für Bioenergie innerhalb von Schutzgebietssystemen. Der Weltnaturschutzverband IUCN unterteilt die Schutzgebiete nach Kategorien, je nach Schutzziel und Nutzungsintensität (IUCN, 1994). Darunter sind auch Kategorien, in denen eine nachhaltige Nutzung mit dem Schutzzweck vereinbar sein kann. Zum Beispiel kann in seit langem genutzten Kulturlandschaften die Erhaltung biologischer Vielfalt häufig nur gewährleistet werden, wenn die historischen Landnutzungen weiter bestehen oder ihre Effekte simuliert werden. Dies gilt z.B. in Mitteleuropa für viele marginale Flächen, auf denen extensive Weide- oder Niederwaldwirtschaft betrieben wurde und die heute eine hohe biologische Vielfalt aufweisen. Dort können bestimmte Bioenergienutzungen (Holzschnitzel, Gras- und Strauchschnitt) mit landschaftspflegerischen Maßnahmen im Sinn des Konzepts „Schutz durch Nutzung“ kombiniert werden (WBGU, 2000; Wiegmann et al., 2007). Auch in Rand- und Pufferzonen zwischen Schutzgebieten und umliegender intensiv genutzter Landschaft kann die Nutzung für Bioenergie bei Auswahl geeigneter Anbausysteme (Kap. 7.1) mit dem Schutzzweck vereinbar sein.

Kasten 5.4-2

Länderstudie Indonesien – Nutzungskonkurrenz mit Naturschutz

Neben Malaysia ist Indonesien mit 42,6 % der Weltproduktion der wichtigste Produzent von Palmöl. Derzeit werden auf 41.200 km² oder 2,3 % der Landesfläche Ölpalmen angebaut – mit stark steigender Tendenz (Abb. 5.4-3). Die Anbaugebiete befinden sich überwiegend in den feuchttropischen Regionen Kalimantans, Sumatras und Sulawesis. Drei Viertel des produzierten Palmöls werden exportiert (FAOSTAT, 2008b).

Indonesien deckt heute 28,5 % seines Primärenergiebedarfs mit der Verbrennung von Biomasse und Abfällen (IEA, 2008c). Durch eine gezielte Biomassestrategie der indonesischen Regierung soll die energetische Nutzung der Biomasse ausgeweitet werden, um den nationalen Energiebedarf decken zu helfen, die Exportwirtschaft im Bioenergiesektor auszubauen und um im ländlichen Raum Arbeitsplätze zu schaffen. Im Inland gilt vor allem die Steigerung der Biokraftstoffnutzung auf mindestens 10 % des Ölverbrauchs bis 2010 als wesentlicher Zielindikator (Setyogroho, 2007). Bei Benzin beträgt die Beimischquote derzeit 3–5 %, wobei das beigemischte Bioethanol vorwiegend aus Zuckerrohr und Cassava hergestellt wird. Die Beimischung bei Diesel, vorwiegend Biodiesel aus Palmöl, beträgt 2,5 %. Es soll zunehmend durch *Jatropha* ergänzt werden (Setyogroho, 2007; Butler, 2008). Zudem existieren auf nationaler Ebene weitere quantitative Ziele. So sollen bis 2010 5,25 Mio. ha „ungenutzten Landes“ mit Ölpalmen, *Jatropha*, Zuckerrohr und Cassava bepflanzt werden (Butler, 2008).

Steigende Energie- und Palmölpreise machen die Exportorientierung der indonesischen Palmölindustrie rentabel. Nirgendwo kann Palmöl in großen Mengen zu so günstigen Preisen produziert werden wie in Indonesien (FAOSTAT, 2008b). Zwar liegen die Herstellungskosten in Thailand und China unter denen in Indonesien, aber weder Thailand noch China verfügen über ausreichend große, für Ölpalmen geeignete Anbauflächen. Mit seinen dünn besiedelten, feuchttropischen Regionen in Kalimantan, Sumatra und Sulawesi sowie der Verfügbarkeit einer großen Zahl billiger Arbeitskräfte hat Indonesien somit wesentliche Vorteile. Da die Wirtschaft Indonesiens außerhalb der Zentren im Wesentlichen auf Landwirtschaft, Fischerei, lokalen Handel sowie in einigen Regionen auf Bergbau beschränkt ist, erhofft man sich eine deutliche Stärkung der ländlichen Regionen. So rechnet Djaja (2006) allein im Anbau von Energiepflanzen mit 7,4 Mio., zum großen Teil zusätzlichen Arbeitsplätzen bis 2010.

Die Waldbedeckung Indonesiens ging innerhalb der letzen 15 Jahren (1990–2005) von 64 % auf 49 % zurück. Im Durchschnitt wurden jährlich 18.715 km² gerodet – in etwa die Fläche Sachsens (FAO, 2006c). Die Ursachen der Entwaldung liegen in der legalen und illegalen Holzentnahme sowie den deutlichen episodischen Waldbränden, für die sich insbesondere nicht intakte Waldökosysteme anfällig zeigen. Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Ausweitung der Palmölplantagen und der Rodung von Primär- und Sekundarwald in Indonesien (Glastra et al., 2002; Reinhardt et al., 2007; UNEP, 2008). Koh und Wilcove (2008) kommen durch Auswertung von FAO-Daten zu dem Schluss, dass im Zeitraum 1990–2005 mehr als die Hälfte der Ausweitung des Palmölanbaus in Indonesien und Malaysia auf Kosten von Primär- und Sekundärwälder ging. Da diese Wälder zu den globalen Hotspots biologischer Vielfalt zählen, geht ihre Zerstörung mit unwiederbringlichen Verlusten biologischer Vielfalt und von Ökosystemleistungen (Kap. 4.2.3) einher.

Abbildung 5.4-3
Entwicklung der Anbaufläche für Ölpalmen in Indonesien.
Quelle: FAOSTAT, 2008b

Dabei ist die Entwaldung für den Anbau von Ölpalmen nicht nur aus Gesichtspunkten des Biotop- und Artenschutzes relevant, sondern zudem aus der Perspektive des Klimaschutzes: Die jährlichen Treibhausgasemissionen durch Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft belaufen sich auf 2.565 Mio. t CO_2eq, was in etwa 84 % der gesamten indonesischen Emissionen entspricht (WRI, 2008). Damit ist Indonesien nach den USA, China und der EU der viertgrößte Emittent von Treibhausgasen. Als besonders problematisch erweist sich dabei der Anbau von Ölpalmen auf Torfböden, da hierbei riesige Mengen an im Boden gespeicherten Kohlenstoff mineralisiert werden und als CO_2 in die Atmosphäre entweichen (Hooijer et al., 2006).

Die indonesische Zentralregierung hat derzeit nur einen sehr begrenzten Einfluss auf die Entwaldung, so dass der Anteil des illegal getätigten Holzeinschlags auf 70–80 % geschätzt wird (World Bank, 2006c). Bezüglich der Umsetzung von Forstgesetzen gibt es ungeklärte Zuständigkeiten sowie personelle Engpässe. Probleme bereitet zudem die Tatsache, dass oft Eliten in Armee, Verwaltung, Politik und Wirtschaft in die Geschäfte um illegale Holzeinschläge involviert sind, so dass entsprechende Regulierungsmaßnahmen bereits auf hoher Ebene blockiert werden (World Bank, 2006c).

5.4.2 Konkurrenz des Bioenergieanbaus mit natürlichen Ökosystemen außerhalb von Schutzgebieten

Der größte Teil der terrestrischen biologischen Vielfalt findet sich außerhalb von Schutzgebieten, vor allem in den natürlichen oder naturnahen Ökosystemen, die derzeit vom Menschen nicht intensiv genutzt werden. Deren Konversion zugunsten landwirtschaftlicher Nutzung ist gegenwärtig der größte direkte Treiber für den Verlust biologischer Vielfalt (Baillie et al., 2004). Dieser Druck wird weiter steigen, denn laut FAO (2003b) werden bis 2030 in Entwicklungsländern 120 Mio. ha zusätzliches Land in

Nutzung genommen. Eine massive Ausweitung der Bioenergienutzung würde diesen Trend erheblich verstärken. Eine Substitution von nur 10 % des Benzin- und Diesel-Verbrauchs in den USA und Europa würde dort 43 % bzw. 38 % der Ackerfläche in Beschlag nehmen oder eine entsprechende Agrarproduktion in andere Länder verlagern (IEA, 2004).

Der Anbau von Bioenergiepflanzen ist besonders in den Tropen attraktiv, da hier Land günstig zur Verfügung steht und bei guten Bedingungen die Hektarerträge hoch sind (Doornbosch und Steenblik, 2007). Gleichzeitig konzentrieren sich hier aber auch die Gebiete mit großer biologischer Vielfalt, die für den Anbau konvertiert werden (Fallstudien in BirdLife International, 2008). So ist die vermehrte Nachfrage nach Biokraftstoffen ein Treiber für die Ausweitung von Palmölplantagen (Kasten 5.4-2). In Südostasien ist der Zusammenhang von Ölpalmplantagen und der Rodung natürlicher Waldflächen zu beobachten (Malaysia, Indonesien; Reinhardt et al., 2007; UNEP, 2008; Koh und Wilcove, 2008). Die Konversion für Ölpalmplantagen ist sehr profitabel und die Governance in einigen Provinzen dieser Länder ungenügend, so dass die bestehenden gesetzlichen Regelungen zum Schutz der Wälder nicht immer greifen (Glastra et al., 2002). Dies bringt nicht nur die Emission großer Mengen an Treibhausgasen mit sich (Hooijer et al., 2006), sondern auch eine erhebliche Gefährdung der biologischen Vielfalt, darunter auch bedrohte Megafauna wie Sumatra-Tiger, Asiatischer Elefant, Sumatra-Rhinozeros und Orang Utan. Im Kasten 5.4-2 wird auf den Palmölboom in Indonesien vertieft eingegangen.

Zudem kann eine Umwidmung von Ackerflächen von der Nahrungsproduktion zur Bioenergieproduktion zu indirekten Verschiebungseffekten führen, was durch Veränderung der Weltmarktpreise zur Konversion natürlicher Ökosysteme führen kann (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMELV, 2007; Searchinger et al., 2008). Diese indirekten Effekte haben das Potenzial, die Konversion natürlicher Ökosysteme und den entsprechenden Verlust biologischer Vielfalt erheblich zu beschleunigen. Ein eindrückliches Beispiel hierfür ist die Ausweitung der Flächen für den Zuckerrohranbau zur Produktion von Bioethanol in Brasilien, was andere Nutzungen (Soja, Weidewirtschaft) in natürliche Ökosysteme mit reicher biologischer Vielfalt verdrängt, etwa im Amazonas (tropischer Regenwald) oder im Cerrado (Klink und Machado, 2005; Sawyer, 2008). Als Cerrado bezeichnet man die brasilianischen Savannen, die als Hotspots eine große biologische Vielfalt aufweisen: Dort leben 50 % aller endemischen brasilianischen Arten und 25 % der gefährdeten brasilianischen Arten. Während etwa 45 % des Cerrado noch die natürliche Vegetation aufweisen, sind derzeit weniger als 2 % unter Schutz gestellt. Die Konversionsrate ist derzeit im Cerrado mindestens doppelt so hoch wie im Amazonasgebiet (Sawyer, 2008). Die Flächen werden zunehmend durch großflächige Monokulturen (Zuckerrohr, Soja) ersetzt, so dass biologische Vielfalt und Ökosystemleistungen verloren gehen (Kaltner et al., 2005; Kap. 5.4.3). Auf dem amerikanischen Kontinent lassen sich diese Verdrängungseffekte sogar im internationalen Maßstab beobachten (Searchinger et al., 2008): Die staatliche Ethanolförderung in den USA führt zu vergrößerten US-Maisanbauflächen und zu verminderten Maisexporten, da ein größerer Teil der Ernte im Land verbleibt, um zu Biokraftstoff verarbeitet zu werden. Auf Kosten des Maisanbaus schrumpfen zudem die US-Sojaanbauflächen und somit das Weltmarktangebot für Soja. Die Folge sind globale Preiserhöhungen bei Soja, was wiederum mit beschleunigter Rodung brasilianischer Regenwälder korreliert, um dort neue Anbauflächen zu gewinnen (Morton et al., 2006).

Dieser Konversion drohen auch Gebiete zum Opfer zu fallen, die wegen ihres hohen Naturschutzwerts als Kandidaten für ein erweitertes Schutzgebietssystem geeignet und vielleicht sogar unverzichtbar wären (Kap. 5.4.1). Insbesondere in Regionen mit hoher Konzentration biologischer Vielfalt (Hotspots: Mittermeier et al., 1999; Myers et al., 2000) oder noch zu geringer ökologischer Repräsentativität im bestehenden Gebietsnetzwerk (MA, 2005a) ist der andauernde Verlust ökologisch wertvoller Flächen bedenklich. Nur ein Bruchteil der Gebiete mit hohem Naturschutzwert (High Conservation Value Areas, HCVA) steht heute bereits unter Naturschutz. Insbesondere im Zuge der Landschaftsplanung für eine nachhaltige Land- und Forstwirtschaft kann das HCVA-Konzept ein wichtiges Instrument für die Erhaltung biologischer Vielfalt sein. Es wurde zuerst durch den Forest Stewardship Council (FSC) eingeführt: Die Identifizierung und Erhaltung des Naturschutzwerts in diesen Gebieten ist eine Voraussetzung für die FSC-Zertifizierung (FSC, 1996). Folgende Gebiete bedürfen dabei eines besonderen Schutzes (WWF, 2007):

- Gebiete mit global, regional oder national bedeutsamer Konzentration von Biodiversität (Hotspots; z.B. Endemismus, gefährdete Arten, genetische Vielfalt);
- Großflächige natürliche Ökosysteme, in denen Populationen der meisten wildlebenden Arten noch in ihren natürlichen Verbreitungsmustern zu finden sind;
- Gebiete mit seltenen oder gefährdeten Ökosystemen;
- Gebiete, die wichtige Ökosystemleistungen erbringen (z.B. Schutz vor Hangrutschungen, Überflutungen, Erosion);

– Gebiete, die wichtige Ökosystemprodukte für die lokale Bevölkerung (z.B. für Subsistenz oder Gesundheit) erbringen oder für deren traditionelle kulturelle Identität von Bedeutung sind (z.B. Gebiete mit religiöser oder spiritueller Bedeutung).

5.4.3 Konkurrenz des Bioenergieanbaus mit der Erhaltung biologischer Vielfalt in Kulturlandschaften

Intensivierung der Anbausysteme

Mehr als drei Viertel der eisfreien Landfläche der Erde sind stark vom Menschen beeinflusste Biome, in denen anthropogene Ökosysteme z.B. der Land- und Forstwirtschaft mit natürlichen oder naturnahen Ökosystemen zu einem Mosaik verwoben sind, in denen ein großer Teil der biologischen Vielfalt zu finden ist (Ellis und Ramankutty, 2008; Kap. 4.2). Die gesteigerte Nachfrage nach Agrarprodukten wird neben der Ausweitung der Nutzflächen vor allem durch die Intensivierung auf den bestehenden Flächen befriedigt werden (Tilman et al., 2002).

Die verstärkte Nutzung von Energiepflanzen wird diesen Trend zur Intensivierung verschärfen. Zum einen sind viele der heute verwendeten Bioenergieanbausysteme intensive Monokulturen, mit denen unter großem Einsatz an Agrartechnologie, Agrochemikalien (Düngemitteln, Pestiziden), Energie und zunehmend auch Bewässerung hohe Ernten erzielt werden sollen (Kap. 7.1). Zum anderen kann durch die zusätzliche Nachfrage nach Kulturland für Bioenergieanbau durch indirekte Verschiebungseffekte auf anderen Flächen die Intensivierung verschärft werden, ähnlich wie auch die Ausweitung der Landnutzung indirekt durch Bioenergiepflanzenanbau verursacht werden kann (Kap. 5.4.2). Intensivierung bedeutet häufig, dass kleinräumige, diverse, eher extensiv ausgerichtete Kulturlandschaft mit vergleichsweise hoher biologischer Vielfalt zu Gunsten großflächiger, biologisch verarmter Monokulturen umgestaltet wird. Bei diesem Prozess ist der Verlust biologischer Vielfalt, genetischer Sortenvielfalt und kultureller Tradition häufig eng miteinander verwoben (FAO, 1996). Ein auch noch so gut funktionierendes, wohl ausgebautes Schutzgebietssystem kann diesen Verlust der biologischen Vielfalt nicht stoppen, wenn die Landnutzung in der umgebenden Kulturlandschaft nicht nachhaltig ist (MA, 2005a).

Die vielfältigen Risiken der Intensivierung für biologische Vielfalt können direkt und indirekt durch vermehrten Anbau von Bioenergiepflanzen ausgelöst werden:

- *Zerstörung und Fragmentierung natürlicher Ökosysteme in der Landschaft:* Bei der Umwandlung in Agrarlandschaften mit großflächigen Monokulturen werden häufig die z.T. kleinskaligen Gebiete mit hohem Naturschutzwert zerstört (z.B. Saum- und Strukturelemente in der Kulturlandschaft, Pufferzonen zu Schutzgebieten und natürlichen Ökosystemen) und damit biologische Vielfalt zusätzlich gefährdet (MA, 2005a).
- *Risiken durch Verlust von Agrobiodiversität*: Die Umwandlung kleinskaliger, biodiverser Anbausysteme in großflächige Monokulturen kann den Verlust an Agrobiodiversität bedeuten, die wesentliche Ökosystemleistungen für eine nachhaltige Landwirtschaft erbringt (Bestäubung, Nährstoffrecycling, Erosionsschutz usw.). Diese Form der Intensivierung ist mit einer genetischen Erosion der Sortenvielfalt verbunden (Phillips und Stolton, 2008).
- *Risiken durch Überdüngung und Eutrophierung:* Verstärkte Bodenbarbeitung, Erosion und Sedimentaustrag führen zu Gefährdungen natürlicher Ökosysteme, die z.T. weit entfernt sein können. Zum Beispiel ist das von US-amerikanischem Ackerland abfließende Wasser stark mit Nährstoffen belastet, die über den Mississippi in den Golf von Mexiko transportiert werden und dort zu großen anoxischen „toten“ Zonen am Meeresboden führen (Donner und Kucharik, 2008; Diaz und Rosenberg, 2008).
- *Risiken durch Pestizidbelastung:* Ohne die Einhaltung von Grenzwerten für Pestizidnutzung und eine nachhaltige Bewirtschaftung gemäß integriertem Pflanzenschutz (SRU, 2007) kann der Eintrag und die Akkumulation von Schadstoffen zu erheblicher Gefährdung biologischer Vielfalt führen.
- *Risiken durch Übernutzung von Wasserressourcen:* Vor allem Bewässerungskulturen einjähriger Bioenergiepflanzen haben einem großen Wasserbedarf (Kap. 5.6). Eine Übernutzung der lokalen Wasserressourcen für die Landwirtschaft geht häufig mit Verlust von Feuchtgebieten einher. Feuchtgebieten beherbergen eine überdurchschnittliche Diversität und sind gleichzeitig überdurchschnittlich von Konversion und Degradation bedroht (IWMI, 2007).
- *Risiken invasiver, gebietsfremder Arten*: Auf die Risiken durch die Ausbreitung invasiver gebietsfremder Arten wird in Kasten 5.4-3 eingegangen.
- *Risiken durch Ausbreitung gentechnisch veränderten Materials:* Die Vermeidung der Ausbreitung gentechnisch veränderten Materials in Wildpopulationen sollte gewährleistet sein (Kasten 7.1-3).

Diese Effekte der Intensivierung gelten ähnlich für die Anbausysteme der Bioenergiepflanzen wie auch

Kasten 5.4-3

Invasive, gebietsfremde Arten

Invasive, gebietsfremde Arten (invasive alien species) sind ein wichtiger Grund für den Verlust biologischer Vielfalt (MA, 2005a). Die Wahrscheinlichkeit, dass eine neu eingeführte Pflanzenart invasiv wird und dadurch Schäden verursacht, ist zwar klein, aber das Schadensausmaß kann sehr groß werden, zumal Invasionen in der Regel irreversibel sind (Mack et al., 2000). Auch im Zusammenhang mit dem Anbau von Bioenergie entstehen neue Risiken. Bei künftigen Bioenergieanbausystemen mit Ganzpflanzennutzung (u. a. Gräser, Holz) kommt es meist auf andere Eigenschaften an als bei Nahrungsmitteln oder stofflicher Nutzung, so dass auch andere Arten oder Sorten für den Anbau in Frage kommen, die bislang agronomisch kaum genutzt sind und deren Risiken für invasives Potenzial noch nicht ausreichend bekannt oder geprüft sind.

Dabei weist die Liste der gewünschten ökologischen Eigenschaften für Bioenergiepflanzen (Heaton et al., 2004) viele Gemeinsamkeiten auf mit den Eigenschaften, die häufig bei invasiven Pflanzenarten gefunden werden (Tab. 5.4-2). Die Wahrscheinlichkeit, dass eine eingeführte Art invasiv wird, steigt mit der Häufigkeit, mit der sie angepflanzt wird (Mack et al., 2000). Auch Arten, die über Jahrzehnte unauffällig waren, können durch großskalige Nutzung ihr invasives Potenzial offenbaren.

Raghu et al., (2006) warnen, dass auch Grasarten wie Chinaschilf *(Miscanthus)* und Rutenhirse *(Panicum)*, die derzeit als Bioenergiepflanzen in der Diskussion sind (Kap. 7.1), Eigenschaften aufweisen, die auf ein erhöhtes invasives Risiko hinweisen. Das Problem muss sehr Ernst genommen werden, da Invasion in den meisten Fällen irreversibel ist, andauernde Kosten für die Land- und Forstwirtschaft und erhebliche Schäden für die biologische Vielfalt mit sich bringt (MA, 2005a). Es sind nur wenige erfolgreiche Beispiele bekannt, bei denen eine invasive Pflanze wieder unter Kontrolle gebracht oder gar ausgerottet werden konnte. Die Anwendung biologischer Bekämpfungsmaßnahmen durch Einführung eines natürlichen Schädlings der invasiven Art ist besonders bei Gräsern mit zusätzlichen Risiken behaftet. Viele unverzichtbare Agrarpflanzen sind ebenfalls Grasarten (Reis, Weizen und andere Getreidearten; Futtergräser für die Tierproduktion usw.), so dass der eingeführte Schädling auf diese Nutzarten übergreifen und dort zu neuen Schäden führen könnte (Goeden und Andres, 1999).

Tabelle 5.4-2
Gewünschte ökologische Eigenschaften für Bioenergiepflanzen und ihre Relevanz für das Risiko invasiver Pflanzenarten.
Quelle: Raghu et al., 2008 und dort zitierte Literatur

Merkmale bei Bioenergiepflanzen erwünscht	Merkmale bei invasiven Arten (1) vorhanden; (2) tragen zum Erfolg bei
C4-Photosynthese	(1), (2)
Lange Bodenbedeckung	(1), (2)
Mehrjährig	(1)
Keine bekannten Schädlinge oder Krankheiten	(1), (2)
Schnelles Wachstum im Frühjahr	(1), (2)
Sterile Samen	(1)
Umverteilung von Nährstoffen in unterirdische Pflanzenteile im Herbst	(1), (2)
Hohe Effizienz der Wassernutzung	(1), (2)

Low und Booth (2007) führen 18 Arten auf, die als Bioenergiepflanzen in der Planung oder bereits in der Anwendung sind, aber gleichzeitig invasives Potenzial besitzen oder bereits invasiv geworden sind. *Jatropha curcas* z.B. wurde in Westaustralien und im Northern Territory nicht als Bioenergiepflanze zugelassen, nachdem eine Untersuchung gezeigt hatte, dass die Pflanze in 14 Ländern als invasiv gilt (Randall, 2004). Der Import von *Jatropha* nach Australien ist aus diesem Grund verboten. Auch *Ricinus communis,* die u. a. in Äthiopien als Bioenergiepflanze verwendet wird, ist in Australien eine invasive Art.

Diese ökologischen Risiken müssen vor der Einführung entsprechender Arten für die Bioenergienutzung sorgfältig geprüft werden (z.B. Mack et al., 2000; CBD, 2002c).

für andere intensive Anbaukulturen. Dabei gibt es allerdings einen Unterschied zwischen den heute verwendeten Bioenergieanbausystemen, die in Bezug auf ihre ökologischen Wirkungen der intensiven Produktion von Nahrungsmitteln (z.B. Getreide), Futtermitteln (z.B. Soja) oder stofflicher Nutzung (z.B. Baumwolle) sehr ähnlich sind (SCBD, 2008), und den in Zukunft verstärkt erwarteten Anbausystemen für Bioenergiepflanzen, bei denen die ganze Pflanze genutzt werden kann (Doyle et al., 2007). In Bezug auf einige dieser ökologischen Wirkungen sind letztere positiver einzuschätzen, wenn mehrjährige, biodiverse Anbausysteme verwendet werden, bei denen nur oberirdische Biomasse geerntet wird und nur wenig Bodenbearbeitung stattfindet (zur Nachhaltigkeit von Bioenergieanbausystemen siehe Kap. 7.1). Gute Versorgung mit Nährstoffen und Wasser durch Düngung und Bewässerung würden auch bei diesen Anbausystemen die Ernteerträge verbessern; viel wird davon abhängen, ob sich dieser zusätzliche Input betriebswirtschaftlich lohnt und ob dieser Input auf nachhaltige Weise erfolgt. Diese Abwägungen sind allerdings noch theoretischer Natur. Da die neuen Anbausysteme noch nicht im großen Maßstab angewandt werden, liegen nur wenig konkrete Erfahrungen über die möglichen positiven oder negativen Wirkungen auf biologische Vielfalt vor (SCBD, 2008).

Marginales Land

Je nach Schätzung und Definition sind 1–3 Mrd. ha oder 7–20 % der terrestrischen Fläche als marginales Land zu bezeichnen, die für eine landwirtschaftliche Produktion aufgrund ihrer geringen Bodenfruchtbarkeit nur sehr begrenzt oder nicht mehr geeignet sind (Kasten 4.2-1; Worldwatch Institute, 2007). Die Gründe dafür sind vielfältig: Manche Felder sind flachgründig, oder liegen an steilen, erosionsgefährdeten Hängen, andere sind versauert oder zu salzhaltig. Fehlende Drainage und Staunässe oder umgekehrt Wassermangel sind weitere Faktoren, die die Produktivität marginaler Böden begrenzen können. In vielen Fällen wurde dieser Zustand durch Degradation anthropogen verursacht, d.h., es wurde produktives Land durch nicht nachhaltige Landnutzung, etwa falsche Bewässerung oder Übernutzung, in marginales Land verwandelt (Smeets et al., 2004).

Es wird häufig vorgeschlagen, Bioenergieanbau nur als Intensivierung der Landnutzung auf marginalem, „ungenutztem" Land zu erlauben, um eine Verdrängung bestehender Landnutzung und somit eine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion zu vermeiden (Kasten 6.7-2; Kap. 5.2). Häufig werden diese Flächen allerdings durch die lokale Bevölkerung z.B. durch extensive Beweidung doch zur Nahrungsmitelproduktion genutzt. Zudem kann eine Konkurrenz mit biologischer Vielfalt kann bestehen (Fritsche et al., 2008), denn eine Restaurierung dieser Flächen bedeutet in der Regel eine Konversion mit nachfolgender Intensivierung. Intensivere, produktivere Flächen haben jedoch meist eine niedrigere biologische Vielfalt als marginale Flächen, vor allem wenn diese längere Zeit der Sukzession überlassen waren (Worldwatch Institute, 2007; Beispiel China: Hepeng, 2008).

Der Anbau geeigneter Energiepflanzen kann aber auch Chancen für die Restaurierung degradierter Flächen bieten, die artenarm und kaum nutzbar sind (z.B. *Imperata*-Grasland in Südostasien). Nachhaltige Anbauverfahren könnten auf bereits degradierten Landflächen positive Wirkungen für biologische Vielfalt erzeugen. Dies gilt vor allem dann, wenn mehrjährige, bodendeckende Bioenergiepflanzen verwendet werden und diese möglichst in Anbausystemen mit mehreren Arten erfolgen (Gräser, Gehölze: Kap. 7.5; The Royal Society, 2008). Eine geeignete Landschaftsplanung vorausgesetzt, können derartige Pflanzungen gleichzeitig andere Ökosystemleistungen erbringen, etwa die Anreicherung von Bodenkohlenstoff und damit eine Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit, Schutzfunktionen gegen Winderosion, oder eine Pufferwirkung für Feuchtgebiete oder Naturschutzgebiete (Worldwatch Institute, 2007; Berndes, 2008). Diese Potenziale sind stark abhängig vom vorliegenden Landschaftstyp und der Art des geplanten Bioenergieanbausystems.

5.4.4 Querschnittsproblem Klimawandel

Der Klimawandel verursacht heute schon sichtbare Verschiebungen von Populationen (Parmesan und Yohe, 2003; Moritz et al., 2008) und wird sich in Zukunft zu einer erheblichen zusätzlichen Bedrohung für die biologische Vielfalt entwickeln (Thomas et al., 2004). Etwa 20–30 % der bislang untersuchten Tier- und Pflanzenarten werden zunehmend einem hohen Aussterberisiko ausgesetzt sein, wenn die globale Mitteltemperatur 2–3°C des vorindustriellen Niveaus übersteigt (IPCC, 2007b). Dabei scheinen die Tropenregionen besonders gefährdet zu sein, die die höchste biologische Vielfalt aufweisen, aber in denen auch die höchsten Verlustraten zu erwarten sind (Colwell et al., 2008; Deutsch et al., 2008).

Aus diesem Grund sind Vermeidungsstrategien notwendig, die dem Anstieg von Treibhausgasen in der Atmosphäre entgegenwirken. Da auch die vermehrte Nutzung von Bioenergie zum Klimaschutz beitragen kann (Kap. 2, 7 und 5.5), kann dies indirekt auch den Verlust biologischer Vielfalt bremsen. Es ergibt sich also ein Abwägungsproblem: je klimafreundlicher Bioenergiepflanzen angebaut und genutzt werden können, desto eher rechtfertigt dies, damit verbundene Verluste biologischer Vielfalt hinzunehmen. Allerdings ist die Treibhausgasbilanz für viele der heutigen Bioenergieanbausysteme unbefriedigend oder sogar klimaschädlich, insbesondere wenn sie mit direkten oder indirekten Landnutzungsänderungen einhergeht (Kap. 9). Die Konversion von Regenwald, Mooren, Savannen oder Grasland für Bioenergieplantagen führen in der Regel zu erheblichen Treibhausgasemissionen, die auch durch langjährige Bioenergienutzung kaum kompensierbar sind (Kap. 4.2, 5.5 und 9; Fargione et al., 2008). Es ergeben sich also Synergien: Die Bewahrung dieser Ökosysteme mit großen natürlichen Kohlenstoffvorräten in der Vegetation oder im Boden ist sowohl aus Sicht des Klimaschutzes als auch des Naturschutzes sinnvoll. Insgesamt fördert die Berücksichtigung der Treibhausgasbilanzen Bioenergieanbausysteme, die aus Sicht der biologischen Vielfalt ebenfalls Vorteile aufweisen (Nutzung mehrjähriger und biodiverser Anbausysteme, lange Rotationszeiten, Akkumulation von Kohlenstoff im Boden usw.: Kap. 7.1). Zu beachten ist, dass sich mit dem Klimawandel die Rentabilität des Anbaus von Bioenergiepflanzen als Folge veränderter Produktivität auch verschlechtern kann.

5.4.5 Folgerungen

Dieses Kapitel macht deutlich, dass der Anbau von Bioenergiepflanzen direkte wie indirekte negative Auswirkungen auf biologische Vielfalt haben kann. Es sind aber auch Synergien denkbar z.B. durch die Reststoffnutzung aus der Landschaftspflege. Daraus leitet der WBGU die folgenden Schlüsse ab:

- *Ausbau und Management des Schutzgebietssystems:* Das bestehende globale Schutzgebietssystem sollte gesichert und ausgeweitet werden (Kap. 10.5). Eine Umwandlung von Flächen in Schutzgebieten für Bioenergieanbau ist abzulehnen. Die Lücken bezüglich der Repräsentativität (Ökosystemtypen, Arten) sollten auf wissenschaftlicher Basis identifiziert und Kandidaten für neue Schutzgebiete ausgewiesen werden. Dabei ist auf die Vernetzung der Gebiete untereinander und auf die Integration in die umliegende Landschaft zu achten (Pufferzonen, Gebiete mit unterschiedlichem Verhältnis von Schutz und nachhaltiger Nutzung). Eine besondere Herausforderung besteht darin, ein verbessertes Management der bestehenden und neuen Schutzgebiete zu sichern. Dabei kann eine nachhaltige Nutzung von Biomasse aus der Landschaftspflege für Bioenergiezwecke in bestimmten Gebieten mit dem Schutzzweck vereinbar sein. Die Umsetzung der international vereinbarten Ziele zu Schutzgebieten und Finanzierungsfragen wird in Kapitel 10.5 behandelt.
- *Konversion naturnaher und natürlicher Ökosysteme für Bioenergie so weit wie möglich einschränken:* Sowohl für die Erhaltung biologischer Vielfalt als auch für den Klimaschutz ist es von großer Bedeutung, die Konversion natürlicher Ökosysteme auch außerhalb eines umfassenden Schutzgebietssystems als direkte oder indirekte Folge des Anbaus von Bioenergiepflanzen so weit wie möglich einzuschränken. Dies gilt insbesondere für Primärwälder, Feuchtgebiete, biodiverse Grasländer und Savannen. Primärwälder, unberührte hochdiverse Grasländer und andere natürliche Ökosysteme mit großem Naturschutzwert, die keinesfalls konvertiert werden sollten. Vor großflächiger Nutzung von marginalem Land sollte eine Prüfung des Naturschutzwerts erfolgen.
- *Erhaltung biologischer Vielfalt beim Anbau von Energiepflanzen berücksichtigen:* Für den Anbau von Energiepflanzen sollten international anerkannte Umweltstandards entwickelt werden, die auch die Erhaltung biologischer Vielfalt als Dimension enthalten (Kap. 10.5). Um die negativen Wirkungen von Intensivierung auf biologische Vielfalt zu mindern, sollten auch über den Anbau von Energiepflanzen hinaus internationale Leitlinien oder Standards für die nachhaltige Landnutzung erarbeitet werden.

5.5 Landnutzungsoptionen für den Klimaschutz

Der Anbau von Energiepflanzen ist nur eine von mehreren Optionen, wie Land genutzt werden kann, um zum Klimaschutz beizutragen. Anbau und Nutzung von Bioenergie ist, wie die bisherigen Ausführungen zeigen, keineswegs unumstritten und nur unter bestimmten Bedingungen eine geeignete Strategie zur Minderung von Treibhausgasemissionen. Außerdem steht diese Form der Landnutzung teilweise in Konkurrenz zu anderen Formen der Landnutzung, die ebenfalls zum Klimaschutz beitragen können und hierfür unter Umständen sogar besser geeignet sein können. Dies umfasst Maßnahmen im Wald- und im Agrarsektor einschließlich der stofflichen Nutzung forst- und landwirtschaftlicher Erzeugnisse. Im Folgenden wird das Klimaschutzpotenzial dieser Landnutzungsoptionen erörtert, Flächennutzungskonkurrenzen bzw. -synergien aufgezeigt sowie ihre Effektivität und Effizienz gegenüber der Nutzung von Bioenergie beleuchtet. Kasten 5.5-1 vergleicht darüber hinaus den Flächenbedarf bei der Nutzung von Bioenergie aus Energiepflanzen mit dem Flächenbedarf bei der Nutzung von Solarenergie.

5.5.1 Wälder und Klimaschutz

5.5.1.1 Vermeidung von Entwaldung und Degradation von Wäldern

Eine gegenwärtig stark diskutierte Form des Klimaschutzes ist die Reduzierung tropischer Entwaldung. Im Jahr 2004 stammten ca. 17 % der globalen Emissionen langlebiger Treibhausgase aus der Entwaldung und dem Zerfall von Biomasse (Rogner et al., 2007). Diese Emissionen stammen überwiegend aus den Tropen. Bioenergienutzung, die den Anbau von Energiepflanzen voraussetzt, kann über verschiedene Mechanismen die Erfolgschancen von Strategien zur Vermeidung tropischer Entwaldung beeinträchtigen.

Ganz offensichtlich kann der Anbau von Energiepflanzen direkt zu Entwaldung führen, wenn etwa Waldfläche direkt in Bioenergieplantagen umgewandelt wird. Darüber hinaus kann aber die Entwaldung auch durch indirekte Effekte begünstigt werden.

Abbildung 5.5-1 zeigt die Emissionen aus Entwaldung für das Jahr 2000 nach Houghton et al. (2003). Nach dieser Quelle waren allein Brasilien und Indonesien für mehr als 50 % der Emissionen aus Entwaldung verantwortlich. Obwohl die vorhandenen Datensätze zu Emissionen aus Entwaldung sowohl in ihrer regionalen Verteilung als auch in ihrer Gesamtsumme voneinander abweichen und nicht konsistent sind, lässt sich trotzdem festhalten, dass Indonesien, Brasilien Malaysia, Kongo, Myanmar und Venezuela besonders hohe Emissionen aus der Entwaldung aufweisen (Schulze et al., 2007). Gleichzeitig ist in einigen dieser Länder mit einer Ausweitung der Bioenergieproduktion zu rechnen: „Recent heavy investments in a number of developed (e.g. Australia and United States) and developing countries (e.g. Brazil, India, Indonesia, Malaysia) indicate that these countries are in the process of becoming producers and possibly exporters of biodiesel“ (UNCTAD, 2006b).

Es liegt daher nahe, dass es erheblicher Anstrengungen bedarf, um in diesen Ländern die Entwaldungsraten zu senken, wenn gleichzeitig durch den zunehmenden Anbau von Bioenergiepflanzen der Druck auf die Land/Waldflächen erhöht wird.

Geist und Lambin (2002) untersuchen die Gründe für Entwaldung anhand von 152 Fallstudien und unterscheiden dabei nach unmittelbaren Ursachen und zugrunde liegenden Einflüssen. Die Ergebnisse zeigen, dass Entwaldung in der Regel auf mehrere unmittelbare Ursachen zurückzuführen ist, die Ausweitung von Agrarland dabei aber in fast allen Fällen eine Rolle spielte. Auch wirkten die zugrunde liegenden Einflüsse selten allein. In einem Drittel der untersuchten Fälle hatten steigende Produktpreise für cash-crops einen Einfluss. Bei steigender Nachfrage nach Bioenergie ist damit zu rechnen, dass es zu Preisanstiegen bei Agrargütern kommt (Kap. 5.2). Neuere Untersuchungen von Morton et al. (2006) zeigen exemplarisch für die Amazonasregion Mato Grosso, dass Entwaldung zugunsten von Ackerland gegenüber Entwaldung zugunsten von Weideland zugenommen hat, wobei das Ausmaß der Entwaldung mit dem Sojapreis korreliert. Searchinger et al. (2008) zeigen in ihren Berechnungen, dass durch Bioenergienutzung ausgelöste Preiserhöhungen die Konversion von Wald und Grasland in Ackerland fördern, und zwar unabhängig davon, ob noch ungenutzte Ackerflächen vorhanden sind. Typische CO_2-Mengen, die dabei freigesetzt werden, sind etwa 604–1.146 t CO_2 pro ha Wald, der in Agrarland umgewandelt wird, und 75–305 t CO_2 pro ha bei der Umwandlung von Grasland oder Savanne (Searchinger et al., 2008). Es ist plausibel, dass eine globale Ausweitung der Bioenergieproduktion die Bemühungen zur Eindämmung tropischer Entwaldung erheblich erschweren wird, selbst wenn die direkte Umwandlung tropischer Wälder in Anbauflächen für Bioenergiepflanzen verhindert werden kann.

Die Kosten der Vermeidung von Entwaldung variieren regional und in Abhängigkeit der entgangenen Alternativnutzungen. Die wachsende Bioenergienachfrage übt hier einen Einfluss über steigende Agrarpreise aus. Geht es allein um die Kompensation für Opportunitätskosten, d.h. für entgangene Erträge aus der Landnutzung, die zur Entwaldung führen würde, dann lassen sich nach einer Schätzung von Grieg-Gran (2006) Emissionen durch Entwaldung für 5 Mrd. US-$ pro Jahr vermeiden, und zwar in einzelnen wichtigen Schwellen- und Entwicklungsländern, die zusammen für die Hälfte dieser globalen Emissionen verantwortlich sind. Das entspricht 483–1.050 US-$ pro ha. Hinzu kommen administrative Kosten von 4 bis 15 US-$ pro ha. Pro vermiedener Tonne CO_2 ergeben sich Durchschnittskosten von 1–2 US-$. Die Kosten fallen höher aus, wenn volkswirtschaftliche (Wachstums-)Effekte, die bei einer Entwaldung und intensiven Landnutzung entstünden, als Opportunitätskosten sowie die direkten Kosten infolge von Abweichungen von einer idealtypischen Schutzpolitik in der Praxis berücksichtigt werden (Nabuurs et al., 2007). Entsprechend haben verschiedene andere Studien deutlich höhere Kosten ermittelt. Nach Schätzungen variieren die Kosten einer Halbierung der Entwaldung zwischen 20 und 33 Mrd. US-$ (Stern, 2008; Strassburg et al., 2008; UNFCCC, 2007b). Um den Prozess der Entwaldung weltweit zu stoppen, würden Kosten von 185 Mrd. US-$ entstehen (UNFCCC, 2007b).

Ob der Erhalt tropischer Primärwälder mit einer relevanten Nutzung für Bioenergie oder für stoffliche Verwendung kombiniert werden kann, scheint zweifelhaft, da das Ökosystem sehr empfindlich auf Störungen reagiert und außerdem bereits flächenmäßig kleine Eingriffe, z. B. der Bau einer Strasse, innerhalb weniger Jahre zur Entwaldung führen (Kap. 7.1.5.1).

Damit stehen Politiken zur Reduzierung der Emissionen aus Entwaldung und Politiken zur Ausweitung der Nutzung von Bioenergie in Konkurrenz zueinander. Schon aus Klimaschutzgründen ist jedoch offensichtlich, dass Entwaldung zugunsten einer Ausweitung der Anbaufläche von Energiepflanzen nicht zielführend ist. Darüber hinaus hat der Erhalt tropischer Primärwälder zahlreiche weitere positive Effekte, etwa auf den Erhalt der Biodiversität (Kap. 5.4). Aus Sicht des WBGU sollte dem Erhalt tropischer Wälder daher in jedem Fall Vorrang vor einem Ausbau der Bioenergienutzung eingeräumt werden. Es gilt entsprechend zu verhindern, dass der Anbau von Energiepflanzen direkt oder indirekt zu tropischer Entwaldung beiträgt (Kap. 9).

Kasten 5.5-1

Flächenbedarf von Solarenergie und Photosynthese im Vergleich

Seit etwa drei Milliarden Jahren verfügen bestimmte Lebewesen auf der Erde über die Fähigkeit, die Energie der Sonne für den Aufbau organischer Stoffe zu nutzen. Dieser Prozess der Photosynthese ist die Grundlage für die Umwandlung von Sonnenenergie in pflanzliche Biomasse und damit letztlich auch für die Gewinnung von Bioenergie. Dennoch ist die Photosynthese bezogen auf ihren Flächenbedarf nicht die effizienteste Methode, Sonnenenergie zu nutzen. So können selbst die produktivsten Pflanzengemeinschaften im Durchschnitt über die Vegetationsperiode und bezogen auf den gesamten Pflanzenbestand nicht mehr als 2 % der eingestrahlten Sonnenenergie nutzen (Kaltschmitt und Hartmann, 2003). Dies liegt einerseits daran, dass ein erheblicher Teil der Sonnenstrahlung außerhalb des für Photosynthese nutzbaren Wellenlängenbereichs liegt, andererseits an unvermeidlichen Energieverlusten durch Reflexion, Absorption, Atmung der Pflanzen sowie bei der Umwandlung von Licht in chemische Energie.

Ein Vergleich des Flächenbedarfs für Bioenergieerzeugung mit dem einer direkten technischen Nutzung der Solarenergie illustriert die unterschiedlichen Effizienzen. Dabei soll für den Vergleich der aktuelle jährliche Weltprimärenergiebedarf von etwa 500 EJ pro Jahr zu Grunde gelegt werden (Kap. 6).

Nimmt man für den Anbau von Energiepflanzen typische Erträge von etwa 10 t Trockenmasse pro Hektar und Jahr (Doornbosch und Steenblik, 2007) sowie einen Energiegehalt der Biomasse von etwa 19 kJ pro Gramm Trockenmasse (Kap. 6.3) an, so wäre für die vollständige Deckung des derzeitigen globalen Bedarfs an Primärenergie durch Bioenergie eine Fläche von 2.500 Mha nötig. (Zum Vergleich: Die in Kapitel 6 ermittelte Fläche, die global für einen nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung steht, beträgt rund 400 Mha.)

Die Flächenbilanz der technischen Nutzung der Sonnenenergie ergibt sich wie folgt. Die mittlere Strahlungsleistung der Sonne, die eine Fläche außerhalb der Erdatmosphäre erreicht, beträgt 1.367 W/m² (Bishop und Rossow, 1991). Davon erreicht allerdings aufgrund des Tagesganges der Sonne, der Jahreszeiten und von Reflexions- und Absorptionsvorgängen in der Atmosphäre nur ein Teil den Boden. Die mittlere jährliche Sonneneinstrahlung hängt zudem noch von der geographischen Lage und dem lokalen Klima ab, in Wüstenregionen kann aber von einem Mittelwert von circa 250 W/m² ausgegangen werden (Bishop und Rossow, 1991). Nimmt man weiterhin einen Wirkungsgrad von 15 % für die Umwandlung der eingestrahlten Sonnenenergie in nutzbare Endenergie an (dies entspricht in etwa einer modernen Photovoltaikanlage), so könnte der derzeitige globale Primärenergiebedarf durch die technische Nutzung der Solarenergie auf einer Fläche von nur 40 Mha erzeugt werden. Dies entspricht einem Quadrat mit einer Kantenlänge von etwas mehr als 600 km und ist um einen Faktor 60 kleiner als die für die gleiche Menge Bioenergie benötigte Fläche.

Langfristig ist daher die direkte technische Nutzung der Solarenergie der Bioenergie aufgrund des geringeren Flächenbedarfs deutlich überlegen, zumal sie auch auf Flächen erfolgen kann, die nicht in Nutzungskonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion oder zum Naturschutz stehen (z.B. Wüsten oder Siedlungsflächen).

5.5.1.2 Aufforstung

Bisher war Klimaschutz nur selten der wichtigste Treiber für Aufforstung. Dies kann sich jedoch mit fortschreitenden globalen Klimaschutzbemühungen ändern, und die Aufforstungsraten könnten stark ansteigen (Nabuurs et al., 2007). Die Senkenwirkung von Aufforstung kann sehr unterschiedlich sein, und hängt u.a. stark von den verwendeten Baumarten und dem Standort ab. Die Akkumulation von Biomasse nach der Aufforstung variiert dabei zwischen 1 und 35 t CO_2 pro Jahr und ha (Richard und Stokes, 2004, zitiert in Nabuurs et al., 2007). Aufforstungsmaßnahmen führen allerdings nicht per se zu einer nennenswerten Kohlenstoffsenke. Vielmehr hängt es wesentlich vom Kohlenstoffgehalt des Bodens ab, ob zunächst Kohlenstoff aufgenommen oder abgegeben wird (Kap. 4.2.3). Aufforstung von Kulturland mit niedrigem Bodenkohlenstoffgehalt führt in der Regel zu einer Zunahme des Bodenkohlenstoffs. Dagegen führt Aufforstung von Land mit hohem Bodenkohlenstoffgehalt (etwa Graslandökosysteme, v.a. auf organischen Böden) zunächst zu einem Rückgang des Bodenkohlenstoffs (Nabuurs et al., 2007). Die Kohlenstoffaufnahmekapazität der terrestrischen Biosphäre ist außerdem begrenzt. Nach Schätzungen von House et al. (2002) könnte selbst im Extremszenario (globale Aufforstung, d.h. sämtliche bis zum Jahr 2000 erfolgten historischen Landnutzungsänderungen würden wieder rückgängig gemacht) lediglich eine Reduktion um 40–70 ppm CO_2 in der Atmosphäre erreicht werden. Zum Vergleich: Die Konzentration liegt heute bereits ca. 100 ppm über dem vorindustriellen Niveau.

Abbildung 5.5-1
Globale Emissionen aus Entwaldung, aufgeschlüsselt nach Staaten. Die Gesamtsumme der hier abgebildeten Emissionen beträgt 2 Gt C.
Quelle: nach Houghton et al., 2003 zitiert in Schulze et al., 2007

Die Klimaschutzwirkung von Aufforstung im Vergleich zur Nutzung von Land für Energiepflanzen muss demnach sowohl nach Standort und Baumart als auch nach Nutzungspfad der Bioenergie differenziert betrachtet werden. Righelato und Spracklen (2007) vergleichen die Treibhausgaseinsparung durch Anbau und Nutzung typischer Biokraftstoffe der ersten Generation im Verkehr mit der Speicherungswirkung von Aufforstung auf derselben Fläche. Die Beispiele umfassen die Nutzung von Zuckerrohr, Weizen, Zuckerrüben und Mais für Ethanol sowie Raps und holzartige Biomasse für Diesel. Dabei liegen die von Righelato verwendeten Werte für vermiedene Emissionen zwischen 0,8 und 7,2 t CO_2 für Ethanol und bis zu 8,1 t CO_2 bei Diesel aus holzartiger Biomasse, jeweils pro Jahr und Hektar. Für Aufforstung (ohne jährliche Ernte) werden die natürliche Konversion von verlassenem tropischen Ackerland (CO_2-Speicherung: 15–29 t CO_2 pro Jahr und ha) und die Aufforstung von temperatem Ackerland mit Kiefern (11,7 t CO_2 pro Jahr und ha) betrachtet. Bei diesen Beispielen könnte über einen 30-Jahres-Zeitraum durch die Aufforstung zwei bis neunmal so viel CO_2 gespeichert werden wie durch die Biokraftstoffnutzung vermieden würde. Die Berechnungen beziehen allerdings mögliche Emissionen aus Landnutzungsänderungen für den Anbau von Bioenergie nicht mit ein, diese würden die Bilanz der Bioenergie im Vergleich zu Aufforstung in der Regel eher noch verschlechtern (Righelato und Spracklen, 2007). Es ist zu diskutieren, ob eine Betrachtung über längere Zeiträume die Relationen der THG-Vermeidung zugunsten der Biokraftstoffnutzung verschieben würde. Neue Studien (Luyssaert et al., 2008) zeigen allerdings, dass selbst sehr alte Wälder (200–800 Jahre) – entgegen der Lehrbuchmeinung – noch erhebliche Mengen CO_2 pro Jahr speichern können (2.4 ± 0.8 t C ha^{-1} yr^{-1}, d.h., 8.8 ± 2.9 t CO_2 ha^{-1} yr^{-1}). Daher ist auch bei längeren Zeiträumen (größer als 30 Jahre) keine Verschiebung der Relationen zu erwarten.

Aufforstung ist nicht gleichzusetzen mit der Anpflanzung von Kurzumtriebsplantagen (KUPs). Dabei werden zwar schnellwachsende Baumarten mit hohem Speicherpotenzial genutzt, aber durch die regelmäßigen Ernten können erhebliche Mengen an Bodenkohlenstoff verloren gehen und zusätzlich Emissionen durch Düngemitteleinsatz entstehen (Kap. 4.2). Je höher die bestehenden Kohlenstoffvorräte im Boden sind, umso höher ist auch die Gefahr, diese durch häufige Ernten und daher Bodenbearbeitung oder -störung freizusetzen, v.a. in den ersten Jahren bis Dekaden der KUP-Nutzung. Für den Erhalt des Bodenkohlenstoffs ist damit eine Aufforstung für die dauerhafte Waldnutzung einer KUP-Nutzung klar vorzuziehen. Ob allerdings die Klimaschutzwirkung von KUPs insgesamt niedriger oder höher ist als die der Aufforstung, hängt auch von der Nutzung der KUPs im Energiesystem und den dadurch substituierten fossilen Energieträgern ab (Kap. 7.3). Generell ist bei der Abwägung der Klimaschutzwirkung zwischen verschiedenen Optionen (z.B. einjährige Energiepflanzen, KUPs, Aufforstung) die Zeitdynamik bei einzelnen Maßnahmen in Betracht zu ziehen (Kap. 5.5.4).

Die geschätzten Kosten der Aufforstung bzw. Wiederaufforstung schwanken deutlich in Abhängigkeit der Region und der bestehenden Landnutzung. Verschiedene Studien haben Vermeidungskosten von 22 US-$/t CO_2 und weniger identifiziert (Nabuurs et al., 2007; Benitez et al. ,zitiert in Stern, 2006). Wie van Kooten et al. (2004) zeigen, können die Kosten deutlich darüber liegen, wenn weitere Schutzaktivitäten des Waldmanagements durchgeführt werden. Abschätzungen des globalen ökonomischen Potenzials für Aufforstung bis 2100 auf der Basis verschiedener CO_2-Preise ergeben eine Spannbreite zwischen 0,57 und 4,03 Gt CO_2 pro Jahr, wofür bis zu 231 Mio. ha Fläche benötigt würden (Canadell und Raupach, 2008).

Großskalige Aufforstung kann negative ökologische und sozioökonomische Auswirkungen haben, etwa eine Reduktion der Ernährungssicherheit, Reduktion des Wasserabflusses, den Verlust von Biodiversität oder Einkommensverluste (Canadell und Raupach, 2008). Waldpflanzungen haben z.B. in der Regel einen höheren Wasser- als Gras- oder Ackerland und können so den lokalen Wasserhaushalt erheblich beeinträchtigen. Je nach Standort und Art der Bepflanzung können aber auch positive Effekte erreicht werden (Jackson et al., 2005). Aufforstungsmaßnahmen sind daher über die Treibhausgasbilanz hinaus in Bezug auf ihre Nachhaltigkeit ebenso differenziert zu betrachten wie der Anbau von Energiepflanzen.

5.5.1.3 Forstmanagement, nachhaltige Forstwirtschaft

Eine weitere Möglichkeit des Klimaschutzes im Waldbereich ist die Erhöhung der Kohlenstoffspeicher in bestehenden Wäldern durch veränderte Managementtechniken, etwa eine Verlängerung von Erntezyklen oder eine Verringerung von Störungen, z.B. durch besseren Schutz vor Waldbränden (v.a. in subtropischen Breiten) oder durch Verminderung von Bodenstörungen durch schwere Maschinen (v.a. in temperaten und borealen Breiten). Dies muss aber nicht notwendigerweise in Konkurrenz zur Nutzung von Forstprodukten für energetische oder andere Zwecke stehen, sondern kann diese umfassen. So

Abbildung 5.5-2
Gegenwärtige flächenbezogene Nettoprimärproduktion. 100 g C pro m² und Jahr entspricht 1 t C pro ha und Jahr oder 3,7 t CO_2 pro ha und Jahr.
Quelle: nach Haberl et al., 2007

kommt der IPCC bei der Betrachtung der verschiedenen Klimaschutzmöglichkeiten im Forstbereich zu dem Schluss: „In the long term, sustainable forest management strategy aimed at maintaining or increasing forest carbon stocks, while producing an annual yield of timber, fibre, or energy from the forest, will generate the largest sustained mitigation benefit (Nabuurs et al, 2007; IPCC , 2007c).

Insbesondere in den Tropen steht die Umsetzung eines solchen Ansatzes jedoch vor großen Problemen. Gegenwärtig stammen z.B. nur 7 % des gehandelten Tropenholzes aus nachhaltiger Forstwirtschaft (Canadell und Raupach, 2008). Gemäß der International Tropical Timber Organization (ITTO) ist eines der größten Hindernisse, dass sich mit anderen Formen der Landnutzung in der Regel höhere Gewinne erzielen lassen als mit nachhaltigem Forstmanagement (ITTO, 2006). Eine nachhaltige Extraktion von Biomasse aus tropischen Primärwäldern erscheint generell schwierig (Kap. 7.1.5.1).

In temperaten Wäldern dagegen ist eine nachhaltige Bewirtschaftung, die auch die Extraktion von Biomasse umfasst, möglich (Kap. 7.1.5.2). Insbesondere die Verjüngung von Wäldern kann aber auch zu einer Netto-Freisetzung von Kohlenstoff führen, die erst nach Jahrhunderten wieder kompensiert wird (Harmon et al., 1990; Luyssaert et al., 2008). Die nachhaltige Nutzung borealer Wälder ist theoretisch möglich, entspricht aber gegenwärtig nicht der gängigen Praxis.

5.5.2 Landwirtschaft und Klimaschutz

Die Landwirtschaft trägt direkt mit 10–12 % zu den globalen Treibhausgas-Emissionen bei (IPCC, 2007c,). Nur ein sehr kleiner Teil davon sind CO_2-Emissionen: Aus landwirtschaftlichen Flächen gelangen zwar sehr große CO_2-Ströme in die Atmosphäre, gleichzeitig findet aber eine CO_2-Rückbindung mittels Photosynthese statt. Die Netto-Emissionen in die Atmosphäre werden auf unter 1 % der globalen anthropogenen CO_2-Emissionen geschätzt (IPCC, 2007c). Die nicht-CO_2-Emissionen aus der Landwirtschaft verteilen sich auf folgende Bereiche:

- 38 % N_2O aus den Böden (v.a. nach Düngung)
- 32 % CH_4 aus der Verdauung von Wiederkäuern (z.B. Rinder, Schafe usw.)
- 12 % aus der Verbrennung von Biomasse
- 11 % aus Nassreisanbau
- 7 % aus Dung

In den meisten Regionen ist N_2O aus den Böden die Hauptquelle der Treibhausgas-Emissionen. Dies

ist vor allem auf die Anwendung von Stickstoffdüngern in der Produktion von pflanzlichen Lebensmitteln und Futtermitteln zurückzuführen. Nur in den Staaten der früheren Sowjetunion, den pazifischen OECD-Ländern, Lateinamerika und der Karibik ist Methan aus der Verdauung der Wiederkäuer die Hauptquelle, was vor allem auf die relativ große Zahl an Tieren in diesen Regionen zurückzuführen ist (Smith et al., 2007b).

Die direkten landwirtschaftlichen Emissionen sind zwischen 1990 und 2005 um 14 % gestiegen, wobei die N_2O-Emissionen aus den Böden überproportional um 21 % gestiegen sind (Smith et al., 2007b). Für die Zukunft wird ein weiterer Anstieg der N_2O aufgrund von steigendem Düngemitteleinsatz und Dungproduktion durch Tiere erwartet. Schätzungen über den Anstieg der landwirtschaftlichen N_2O-Emissionen rangieren zwischen 35 % und 60 % bis 2020 bzw. 2030. Für die mit der Tierproduktion verbundenen CH_4-Emissionen werden für diesen Zeitraum Anstiege zwischen 20 % und 60 % prognostiziert, für die CH_4-Emissionen aus Nassreisanbau wird hingegen nur ein geringer Anstieg von wenigen Prozent oder sogar eine Reduktion erwartet (IPCC, 2007c).

Möglichkeiten der Landwirtschaft, zum Klimaschutz beizutragen, bieten sich durch eine Reduktion der CO_2, N_2O und CH_4-Emissionen, durch eine Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung im Boden bzw. der Biomasse, sowie durch die Nutzung landwirtschaftlicher Produkte und Reststoffe für die Herstellung von Bioenergie (IPCC, 2007c).

Viele Faktoren werden es in Zukunft weiterhin notwendig machen, die Flächenproduktivität auf den bestehenden Agrarflächen zu erhöhen (Kap. 5.2). Dies wird einen erhöhten Einsatz von Düngemitteln und eine Ausweitung bewässerter Flächen erfordern, und damit einen erhöhten Energieeinsatz nach sich ziehen. Darüber hinaus können diese Maßnahmen zu erhöhten Treibhausgasemissonen führen (Smith et al., 2007b). Kommt ein gesteigerter Anbau von Energiepflanzen hinzu, ist es wahrscheinlich, dass durch die erhöhte Flächenkonkurrenz auch die Anforderungen an die Erhöhung der Produktivität auf den bestehenden Agrarflächen steigen (Kap. 5.2). In welchem Ausmaß dies zu einer weiteren Erhöhung der THG-Emissionen auf den Agrarflächen beiträgt, kann nicht pauschal beantwortet werden. Es ist aber offensichtlich, dass eine große Zahl von Einzelentscheidungen über Managementoptionen (wie z.B. Effizienzverbesserungen beim Düngemitteleinsatz) das Ausmaß dieser auch durch den Energiepflanzenanbau induzierten Emissionssteigerungen bestimmen wird. Die Nutzung von Flächen zum Anbau von Energiepflanzen wirkt damit tendenziell Bestrebungen entgegen, die Emissionen aus den bestehenden Agrarflächen zu senken.

Eine der effektivsten Methoden zur Minderung der Emissionen im Landwirtschaftsbereich ist nach Aussage des IPCC die Umwandlung von Ackerland in Land mit naturnaher Vegetation (Smith et al., 2007a). Diese sollte aber unter dem Gesichtspunkt der Ernährungssicherheit ebenso kritisch gesehen werden wie die Nutzung von Ackerflächen für den Anbau von Energiepflanzen (Kap. 5.2). Der Mechanismus zum Klimaschutz besteht hier also nicht in der Vermeidung von Emissionen, sondern in der Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung im Boden bzw. der Biomasse. Auch diese Möglichkeit steht einerseits zunächst einmal in Konkurrenz zu der Option, Ackerland für die Produktion von Energiepflanzen zu nutzen. Es ist andererseits aber möglich, die Produktion von Biomasse für die energetische Nutzung mit einer Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung im Boden zu kombinieren, wenn geeignete Anbausysteme Anwendung finden (Kap. 7.1 und 4.2). Ähnliches gilt für die Sanierung („restoration“) von drainierten und degradierten Böden: Steigt der Druck auf die Landflächen durch einen verstärkten Biomasseanbau, kann dies dazu führen, dass marginale Flächen wieder in Nutzung genommen werden. Einerseits kann dies das Risiko von Erosion und weiterer Degradation erhöhen, wobei die Konsequenzen in Form möglicher CO_2-Emissionen sehr unsicher sind (Smith et al., 2007b), andererseits kann etwa die Nutzung marginaler Flächen für die Bioenergieproduktion bei geeigneten Anbausystemen und geeignetem Management gerade auch zu deren Sanierung und damit zum Klimaschutz beitragen (Kap. 4.2 und 5.6).

5.5.3 Klimaschutz durch Nutzung langlebiger Biomasseprodukte

Biomasse ist ein Kohlenstoffspeicher, wobei der Kohlenstoff beim Aufwuchs der Pflanzen durch Photosynthese aus dem CO_2 der Atmosphäre gewonnen wird. Beispielsweise entspricht der in einem Kubikmeter Holz gebundene Kohlenstoff etwa 0,92 t CO_2 (Nabuurs et al., 2007). Je nach Region fixiert die terrestrische Biosphäre durch Photosynthese jährlich pro ha 0–55 t CO_2 (0–15 t C), die so genannte Nettoprimärproduktion (Abb. 5.5-2). Jährlich werden so weltweit durch Photosynthese insgesamt etwa 217 Gt CO_2 (entsprechend 59 Gt C) in der Biomasse fixiert, wovon der Mensch durch Ernte etwa 14 % (30 Gt CO_2 bzw. 8 Gt C) wieder entnimmt (Haberl et al., 2007). Dieser Kohlenstofffixierung durch die Photosynthese steht allerdings eine fast ebenso hohe CO_2-

Emission aus dem Abbau von Biomasse gegenüber, womit die Netto CO_2-Speicherung der terrestrischen Biosphäre nur etwa 3,7 Gt CO_2 beträgt (entsprechend 1 Gt C), allerdings mit großen zwischenjährlichen Schwankungen (WBGU, 2003b). Die Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger und der Zementindustrie lagen im Jahr 2006 bei 8,4 Gt C (Canadell et al., 2007). Der Vergleich dieser Zahlen macht deutlich, dass eine veränderte durchschnittliche Lebensdauer der Ernteprodukte durchaus einen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf und damit die CO_2-Konzentration der Atmosphäre haben kann. Bei Biomasse, die zur Energieerzeugung genutzt wird, wird der gespeicherte Kohlenstoff in der Regel relativ zügig und unmittelbar wieder an die Atmosphäre abgegeben – hier besteht der erhoffte Klimaschutz also in der Substitution emissionsintensiverer Energieträger (Kap. 7). Dagegen bleibt bei der stofflichen Nutzung von Biomasse der Kohlenstoff zunächst fixiert. Insbesondere Holzprodukte und langlebige Bio-Kunststoffe sind hier zu erwähnen. Ein Spezialfall der langfristigen Fixierung von Kohlenstoff in Biomasse ist die „Black Carbon Sequestration (Kasten 5.5-2).

Nach Berechnungen von Pingoud (2003, zitiert in UNFCCC, 2003) nahm der global in Holzprodukten gespeicherte Kohlenstoff zwischen 1960 und 2000 im Durchschnitt um 0,04 Gt C (entsprechend 0,15 Gt CO_2) pro Jahr zu, und stieg in diesem Zeitraum von 1,5 Gt C (5,5 Gt CO_2) auf mehr als 3 Gt C (11 Gt CO_2). Allerdings entspricht dies weniger als 1 % der kumulativen anthropogenen CO_2-Emissionen von ca. 264 GtC in diesem Zeitraum (WRI, 2008).

Neben der direkten temporären Speicherung von Kohlenstoff können Biomasseprodukte zusätzlich emissionsintensive Materialien wie Beton, Stahl, Aluminium und Kunststoffe ersetzen. Nach Nabuurs et al. (2007) kann etwa ein besonders hoher Klimaschutzeffekt durch Holz erreicht werden, indem es zunächst stofflich genutzt wird und dabei die Nutzung von Beton substituiert, und nach Beendigung dieser Nutzung energetisch verwandt wird. Eine Studie von Reinhardt et al. (IFEU, 2007) untersucht die Auswirkungen der Biomassenutzung in der chemischen Industrie und kommt zu dem Schluss, dass durch die Substitution fossiler Grundstoffe durch Biomasse bezogen auf die Anbaufläche ähnlich viel Treibhausgasemissionen vermieden werden können wie bei der energetischen Nutzung im Verkehrsbereich.

Die Diskussion macht deutlich, dass auch im Bereich der stofflichen Nutzung von Biomasse ernstzunehmende Klimaschutzoptionen bestehen, die aber nicht immer in Konkurrenz zur energetischen Nutzung stehen, sondern teilweise im Sinne einer Kaskadennutzung auch mit ihr kombiniert werden können.

5.5.4 Schlussfolgerungen

Die Analyse des vorliegenden Kapitels macht deutlich, dass die energetische Nutzung von Biomasse als Klimaschutzoption vielfach direkt oder indirekt in Konkurrenz zu anderen Klimaschutzoptionen steht. Die direkte Konkurrenz betrifft erstens die Landfläche: Entweder kann sie zur Produktion von Energiepflanzen genutzt werden, die fossile Energieträger ersetzen, oder es kann angestrebt werden, den auf der Fläche gespeicherten Kohlenstoff zu erhöhen bzw. (durch Verzicht auf Entwaldung oder Graslandumbruch zugunsten von Energiepflanzenanbau) zu erhalten. Zweitens gibt es eine direkte Konkurrenz um die zu nutzende Biomasse: Entweder kann ihre Eigenschaft als Kohlenstoffreservoir genutzt werden indem die Biomasse als Rohstoff verwendet oder anderweitig vor Oxidation und Abbau geschützt wird (Kasten 5.5-2), oder sie kann energetisch genutzt werden, wobei der in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff wieder freigesetzt wird, dafür aber andere emissionsintensive Energieformen substituiert werden können.

Über die direkten Konkurrenzen hinaus gibt es zusätzlich aber auch noch die indirekten Effekte, die über den Umweg der Agrarpreise auftreten: Je mehr der Druck auf die Agrarflächen durch eine Ausweitung des Energiepflanzenanbaus steigt, desto anspruchsvoller und schwieriger können andere Klimaschutzmaßnahmen durchgesetzt werden, z.B. im Landnutzungsbereich, etwa durch die Reduktion der Entwaldung oder eine Minderung der N_2O-Emissionen durch einen verbesserten Düngemitteleinsatz.

Soll mit der Bioenergienutzung das Ziel verfolgt werden, zum Klimaschutz beizutragen, muss also zwischen diesen verschiedenen Klimaschutzoptionen abgewogen werden (Abb. 5.5-3).

Umfassende Treibhausgasbilanzen verschiedener Maßnahmen können hier eine Orientierung geben (Kap. 7). Für den Vergleich der verschiedenen Klimaschutzoptionen untereinander und eine Abwägung, wie sie möglichst gut dazu beitragen können, dass die Klimaschutzleitplanke eingehalten wird, genügt allerdings der Blick auf die unmittelbaren Emissionen und Emissionsminderungen nicht, sondern es muss auch die jeweilige Zeitdynamik einbezogen werden. Tab. 5.5-1 gibt einen Überblick über die Zeitdynamiken der verschiedenen Klimaschutzoptionen im Landnutzungsbereich. Um einen gefährlichen Klimawandel zu vermeiden, d.h. aus Sicht des WBGU eine globale Temperaturerhöhung

Kasten 5.5-2

Black Carbon Sequestration als Klimaschutzoption

Seit einiger Zeit wird die Sequestrierung von Holzkohle („Black Carbon Sequestration") als möglicher Beitrag zum Klimaschutz diskutiert (z.B. Marris, 2006; Lehmann, 2007). Ausgangspunkt ist die Leistung der Photosynthese, der Atmosphäre CO_2 zu entziehen und als Kohlenstoff in der Biomasse zu speichern. Für die Biosequestrierung wird zunächst Biomasse unter Ausschluss von Sauerstoff erhitzt („Niedrigtemperaturpyrolyse"), wobei sowohl Holzkohle als auch flüchtige organische Substanzen produziert werden. Die flüchtigen Substanzen können als Biogas oder Flüssigtreibstoff zur Energiegewinnung genutzt werden, während die Holzkohlezur Kohlenstoffsequestrierung in Agrarböden eingebracht werden kann. Dort hat sie eine relative hohe Lebensdauer, wie hoch genau, ist allerdings Gegenstand der Forschung – Schätzungen rangieren zwischen Jahrhunderten und Jahrtausenden (Lehmann, 2007). Neben der langfristigen Speicherung des von den Pflanzen aus der Atmosphäre aufgenommenen Kohlenstoffs im Boden verbessert zudem die Holzkohle die Struktur und die Fruchtbarkeit der Böden. Dieser Effekt ist von den sehr fruchtbaren *terra preta*-Böden aus dem Amazonasbecken bekannt (Denevan und Woods, 2004; Fowles, 2007). Bei unterirdischer Deponierung der Holzkohle ließen sich sogar noch längere Speicherzeiten erreichen, allerdings ohne den positiven Einfluss auf die Bodenfruchtbarkeit. .

Würde man die entstehende Holzkohle selbst energetisch verwenden, könnten dadurch direkt fossile Energieträger ersetzt werden. Nach Berechnungen von Lehmann (2007) führt jedoch die Einbringung der Holzkohle in den Boden zu einer 12–84 % höheren Emissionsreduktion als die energetische Nutzung. Der Autor schätzt weiterhin, dass die Sequestrierung der Holzkohle in Kombination mit der energetischen Nutzung der bei der Pyrolyse entstehenden Abgase ab einem CO_2-Preis von 37 US-$ t rentabel sein könnte. Bei der Bewertung dieser Klimaschutzoption müssen allerdings mögliche Zielkonflikte berücksichtigt werden, die sich aus dem steigenden Bedarf nach Energie und organischen Rohstoffen ergeben.

von 2°C über dem vorindustriellen Niveau nicht zu überschreiten, muss einerseits möglichst rasch eine Trendumkehr der globalen Emissionen erreicht werden, andererseits jedoch auch die Grundlage zu langfristigen, stetigen und substanziellen weiteren Emissionsminderungen bis über die Mitte des Jahrhunderts hinaus gelegt werden.

Neben den Klimaschutzoptionen im Landnutzungsbereich ist hier vor allem die Minderung der Emissionen fossiler Energieträger ausschlaggebend. Bioenergie betrifft beide Bereiche gleichermaßen. Im Vergleich mit Emissionen aus fossilen Energieträgern ist bedeutsam, dass CO_2-Emissionen aus Landnutzung und Landnutzungsänderungen überwiegend in dem Sinne reversibel sind, dass eine entsprechende Menge CO_2 theoretisch (bei entsprechendem Management) in einem überschaubaren Zeitraum (einige Jahre bis Jahrzehnte) wieder vollständig von der Biosphäre aufgenommen werden kann. Gleichzeitig ist eine CO_2-Speicherung auf der Fläche durch Ökosysteme in der Regel zeitlich durch die Bewirtschaftung begrenzt und die jährliche Zunahme der Speicherung wird mit der Zeit geringer (Smith et al., 2007a), auch wenn selbst sehr alte Ökosysteme noch erhebliche Mengen CO_2 festlegen können (Luyssaert et al., 2008). Darüber hinaus können in vielen Fällen durch eine Änderung des Managements große Mengen des in Biomasse und Boden festgelegten Kohlenstoffs wieder freigesetzt werden, z.B. wenn das Ökosystem degradiert wird oder veränderte Bewirtschaftungstechniken eingesetzt werden.

Bei CO_2-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger verbleibt hingegen ein erheblicher Anteil von 20 % über Jahrtausende in der Atmosphäre (IPCC, 2007a). Montenegro et al. (2007) gehen sogar davon aus, dass ein Anteil von 25 % über mehr als 5000 Jahre in der Atmosphäre verbleibt. Abbildung 5.5-4 stellt schematisch die Kohlenstoffreservoire und Kohlenstoffflüsse dar, die die CO_2-Konzentration der Atmosphäre bestimmen, und macht die Unterschiede deutlich.

House et al. (2002) folgern aus ihren Berechnungen: „It follows that although land use and land management may have an impact on future atmospheric CO_2-concentrations, even highly extreme and improbable land use change options to reduce the build-up of atmospheric CO_2 would have small effects in comparison to the consequences of different possible trends in fossil fuel use over the course of the 21st Century."

Es ist daher offensichtlich, dass die Bemühungen, die Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger zu senken, das Herzstück einer ambitionierten Kli-

Abbildung 5.5-3
Klimaschutz durch geeignete Landnutzung: Abwägung der Optionen am Beispiel des Forstsektors.
Quelle: Nabuurs et al., 2007

Tabelle 5.5-1
Zeitdynamiken der Klimaschutzoptionen im Landnutzungsbereich.
Quelle: verändert nach Nabuurs et al., 2007

	Vermeidungsmechanismus	Auswirkung	Zeitlicher Verlauf der Auswirkung	Zeitlicher Verlauf der Kosten
A	Ausweitung der Kohlenstoffspeicher auf der Fläche: Aufforstung, Management usw.	⇧	⟋	⟍
B	Erhalt von Kohlenstoffspeichern auf der Fläche: Vermeidung von Entwaldung, Degradation usw.	⬇	⟍	⟍
C	Ausweitung von Kohlenstoffspeichern in Biomasseprodukten	⇧	—	⟍
D	Energetische Nutzung von Biomasse und Substitution (wenn **B** gegeben ist)	⬇	—	⟍

Auswirkung
⇧ Ausweitung von Senken
⬇ Reduktion von Quellen

Zeitlicher Verlauf der Auswirkung
⟋ verzögert
⟍ unmittelbar
— fortlaufend oder wiederholt

Zeitlicher Verlauf der Kosten
⟋ verzögert
⟍ anfänglich
⟍ kontinuierlich

maschutzpolitik darstellen müssen. Die Senkung der Emissionen aus fossilen Energieträgern ist aus Sicht des Klimaschutzes nur unzureichend durch Maßnahmen im Landnutzungsbereich substituierbar. Dennoch müssen auch Maßnahmen im Landnutzungsbereich mit hoher Priorität verfolgt werden, insbesondere dort, wo Synergien mit anderen Nachhaltigkeitszielen wie dem Erhalt der biologischen Vielfalt bestehen. Diese Überlegungen machen deutlich, dass selbst eine Lebenszyklusanalyse der Treibhausgasbilanz zur Nutzung von Bioenergie nur begrenzt aussagefähig ist, v.a. hinsichtlich des Beitrags der Bioenergie zur Einhaltung der 2°C-Leitplanke des WBGU: Die Lebenszyklusanalyse stellt gewissermaßen eine Momentaufnahme dar, bei der aber die unterschiedlichen Charakteristika der Emissionen bzw. Emissionsminderungen aus dem Landnutzungsbereich und aus anderen Sektoren – etwa in Bezug auf ihre längerfristige zeitliche Dynamik, ihre Reversibilität usw. – nicht abgebildet werden. Sie kann daher nur ein Baustein in der Beurteilung und Abwägung verschiedener Klimaschutzmaßnahmen in Bezug auf eine umfassende Klimaschutzstrategie sein.

Abbildung 5.5-4
Schema des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Die atmosphärische CO_2-Konzentration wird im Wesentlichen bestimmt durch
1: CO_2-Flüsse zwischen dem Ozean und der Atmosphäre: Dabei handelt es sich um große natürliche Flüsse, die nach heutigem Technikstand nicht direkt durch den Menschen kontrollierbar sind. Der Mensch beeinflusst sie aber indirekt über die atmosphärische CO_2-Konzentration. Wirkt als Puffer.
2: CO_2-Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger: Diese Flüsse sind ausschließlich anthropogen und damit vollständig kontrollierbar. Nach heutigem Stand (technische CO_2-Sequestrierung noch nicht großmaßstäblich einsetzbar) sind sie weitgehend irreversibel. Es gibt eine hohe Messgenauigkeit bei der Quantifizierung dieser Flüsse.
3: CO_2-Flüsse zwischen der terrestrischen Biosphäre (inkl. Biomasseprodukten) und der Atmosphäre: Dies sind große, überwiegend natürliche Flüsse, die nur zu einem kleinen Teil (vor allem durch Landnutzungsänderungen) vom Menschen beeinflussbar sind. Durch Management im Landnutzungssektor lässt sich die Aufteilung des Kohlenstoffs zwischen Atmosphäre und terrestrischer Biosphäre in Grenzen verschieben. Diese Maßnahmen sind überwiegend reversibel und die Messgenauigkeit der Flüsse ist vergleichsweise gering.
Quelle: WBGU

5.6 Nutzungskonkurrenz um Boden und Wasser

5.6.1 Bodendegradation und Desertifikation

Der verstärkte Anbau von Energiepflanzen kann die Gefahr der Bodendegradation erhöhen, er kann

aber auch zur Restaurierung von degradierten Flächen beitragen. Es hängt letztlich vom Anbausystem (Kap. 7.1) und den regionalen agrarökologischen Bedingungen ab, ob die Kultivierung von Energiepflanzen aus Sicht des Bodenschutzes förderungswürdig, akzeptabel oder abzulehnen ist. Bei nicht angepassten Anbausystemen (z.B. ungeeignete Bodenbearbeitung oder Bewässerung) gerade auf marginalen Böden können die Risiken für weitere Bodendegradation erheblich sein. Welche Anbausysteme zur Verringerung der Risiken geeignet sind und welches Potenzial zur Restaurierung von Böden besteht, sollte durch Forschungsvorhaben geklärt werden.

Landflächen sind weltweit von Bodendegradation betroffen. Besonders gefährdet sind die Trockengebiete der Erde, die 40 % der Landfläche ausmachen. Über 250 Millionen Menschen sind hier direkt betroffen, eine weitere Milliarde Menschen lebt in gefährdeten Gebieten. Die meisten Entwicklungsländer liegen in den Trockenzonen der Erde, die 50 ärmsten Länder sind daher auch am stärksten betroffen von Desertifikation , d.h. Bodendegradation in Trockengebieten (UNCCD, 2008). In Afrika gelten 65 % des Ackerlandes, 31 % der Weiden und 19 % der Wälder als geschädigt. Aber auch Lateinamerika (45 % der Ackerflächen, 14 % der Weiden, 13 % der Wälder) und Asien (38 % der Ackerflächen, 20 % der Weiden, 27 %, der Wälder) sind betroffen, insbesondere China (FAO, 1990 zitiert in WBGU, 1994; MA 2005e). Bei der Bodendegradation werden vier Stufen der Intensität der Degradation unterschieden (Oldeman et al., 1991): „Leicht“ bedeutet, dass der Boden für die Landwirtschaft nicht mehr vollständig nutzbar, aber eine Restauration auf volle Produktivität möglich ist. Bei „mittlerer“ Schädigung ist die landwirtschaftliche Produktivität stark reduziert, und es sind große Anstrengungen notwendig, um die Böden wieder vollständig und produktiv nutzen zu können. „Stark“ degradierte Böden haben ihre Produktionskapazität verloren und sind nicht mehr für die Landwirtschaft nutzbar. Größte Investitionen und ein hoher Energieaufwand wären langfristig zur Sanierung erforderlich. „Extrem“ geschädigte Böden sind nicht kultivierbar und nicht mehr zu restaurieren.

In der Potenzialabschätzung des WBGU für den Anbau von Energiepflanzen (Kap. 6) wurden die beiden höchsten Stufen „stark“ und „extrem“ degradierter Böden nicht berücksichtigt. Es bleiben aber 84 % der von „leichter“ bis „mittlerer“ Degradation betroffenen Böden, deren Produktivitätskapazität für die Nahrungsproduktion stark reduziert sind und daher nicht in direkter Nutzungskonkurrenz mit der Nahrungsproduktion stehen. Bei richtiger Auswahl und geeignetem Management kann der Anbau von Energiepflanzen auf diesen Flächen sogar Chancen bieten, wenn durch die Pflanzung weitere Degradation verhindert wird. Langfristig können dadurch der organische Bodenkohlenstoff und damit die Bodenqualität dieser marginalen Flächen sogar wieder verbessert werden. Dabei ist zu beachten, dass marginale bzw. degradierte Böden (Kasten 4.2-1) in der Regel anfälliger sind für (weitere) Bodendegradation als hoch produktive Böden. Daher sollte nach Ansicht des WBGU eine Kultivierung von Energiepflanzen auf marginalen Böden nur erfolgen, wenn zuvor eine Bodenschutzstrategie erarbeitet wurde, in der die lokalen Gegebenheiten mit den verfügbaren Anbau- und Managementsystemen abgestimmt werden. Mehrjährigen Pflanzen, die möglichst in Mischkultur angebaut werden, nur wenig Bodenbearbeitung benötigen und bei denen die Wurzelbiomasse im Boden verbleibt, ist dabei Vorrang einzuräumen (Kap. 7.1).

Langfristig bietet der nachhaltige Anbau geeigneter Energiepflanzen auf marginalen Flächen durch die Eröffnung der folgenden strategischen Option einen weiteren Vorteil. Da der WBGU davon ausgeht, dass der Energiepflanzenanbau nur für eine Übergangszeit eine wichtige Rolle im globalen Energiemix spielen wird (Kap. 8.3), bietet sich die Möglichkeit, dass ein Teil der Flächen durch den Anbau von Energiepflanzen soweit restauriert werden kann, dass sie später für die Nahrungsproduktion oder die stoffliche Nutzung zur Verfügung stehen könnten. Damit würde der zunehmende Druck auf die Landnutzung ein wenig gedämpft.

5.6.2 Übernutzung von Süßwasserressourcen

Der Anbau von Energiepflanzen kann jedoch nicht nur die Nutzungskonkurrenz um Land, sondern auch um verfügbare Süßwasserressourcen intensivieren. Besonders gefährdet sind Regionen, die bereits heute unter Wasserknappheit leiden wie etwa Zentralasien, Teile Südasiens und Nordafrika oder Afrika südlich der Sahara, wo Bevölkerungswachstum und eine Vernachlässigung des Wassersektors zur Verknappung führen. Gleichzeitig kann der Anbau von Energiepflanzen die Konkurrenz um Süßwasser erheblich verschärfen, er kann aber auch zur Verbesserung der Wassernutzungseffizienz beitragen (Lundqvist et al., 2008). Der Mensch nutzt oder reguliert bereits über 40 % der erneuerbaren, zugänglichen Süßwasserressourcen (MA, 2005d). Der Druck auf die globalen Süßwasserressourcen steigt mit ca. 10 % pro Jahrzehnt weiter an (Gesamtnutzung des Süßwassers), vor allem durch wachsenden Wohlstand (steigender Pro-Kopf-Wasserverbrauch) und Bevölkerungswachstum (u.a. steigender Wasserbedarf der

Bewässerungslandwirtschaft). Bereits heute leben 1,2 Mrd. Menschen in Regionen, die von Wasserknappheit betroffen sind. Allein um den steigenden Nahrungsbedarf zu decken, wird sich die Wasserentnahme bis zum Jahr 2050 um etwa 20 % erhöhen (de Fraiture et al., 2007). Der Anbau von Energiepflanzen erhöht den Nutzungsdruck auf das regional verfügbare Süßwasser weiter (McCornick et al., 2008) und kann zur Übernutzung in einer Region beitragen, also dazu, dass die Wasserentnahme die natürliche Erneuerungsrate überschreitet (Abb. 5.6-1). Nach einer Schätzung des IWMI (2007) könnte sich bei sehr starkem Ausbau der Bioenergie im Jahr 2050 die Wassernutzung (gemessen als landwirtschaftliche Evapotranspiration) durch Energiepflanzen nahezu verdoppeln. Auch Lundquist geht insgesamt von einer Verdopplung aus, aber nicht alleine durch Energiepflanzen. Die sind in seiner Studie nur für rund 20–40 % für den erhöhten Wasserbedarf verantwortlich (Lundqvist et al., 2008).

Der Einfluss von Energiepflanzen auf den hydrologischen Kreislauf hängt u.a. ab von (Berndes, 2008):

- dem Ort bzw. dem Wassereinzugsgebiet, in dem die Energiepflanze angebaut wird, und dessen agrarökologischer Ausstattung, insbesondere dem Süßwasserdargebot,
- der angebauten Energiepflanze, deren Wasserbedarf aufgrund ihrer Wassernutzungseffizienz stark variieren kann,
- dem durch den Energiepflanzenanbau ersetzten Vegetationstyp. Die Nettoänderung in Bezug auf die Wasserverfügbarkeit kann dabei positiv oder negativ sein. Auf Landflächen mit spärlicher Vegetation kann durch den Energiepflanzenanbau die Wasserverfügbarkeit verbessert werden (z.B. durch verminderten Oberflächenabfluss und besserer Infiltration), während die Rodung eines dichten Waldes für den Anbau von Soja oder Mais die Wasserverfügbarkeit verschlechtert (z.B. durch kürzere Bodenbedeckungszeiten und dadurch erhöhten Oberflächenabfluss).

Bereits heute transpirieren Anbaukulturen global jährlich rund 7.000 km³ Süßwasser (inkl. Verdunstung), das bei Bewässerungskulturen aus Flüssen, Seen oder Aquiferen stammt („blaues“ Wasser). Energiepflanzen nutzen derzeit zusätzlich etwa 100 km³ (oder etwa 1 %) (de Fraiture et al., 2007). Um einen Liter Biokraftstoff aus Energiepflanzen zu erzeugen, werden durchschnittlich etwa 820 l Bewässerungswasser eingesetzt. Im Durchschnitt werden 2.500 l Wasser evapotranspiriert. Diese Durchschnittswerte sind allerdings schwierig zu interpretieren, weil es erhebliche regionale Unterschiede gibt (Tab. 5.6-1). In Europa, wo überwiegend Raps und Mais im Regenfeldbau angebaut werden, ist der Anteil der Bewässerung sehr gering. In den USA, wo Mais meist im Regenfeldbau angebaut wird, beläuft sich der Anteil des Bewässerungswassers für den Energiepflanzenanbau auf 3 %, das entspricht 400 l Bewässerungswasser pro Liter Bioethanol. In Brasilien ist Zuckerrohr die wichtigste Energiepflanze, die überwiegend im Regenfeldbau kultiviert wird, so dass nur sehr wenig Bewässerungswasser für den Energiepflanzenanbau verwendet wird. Dagegen werden in China durchschnittlich 2.400 l Bewässerungswasser zur Herstellung von einem Liter Ethanol aus Mais verwendet. Insgesamt werden rund 2 % des Bewässerungswassers in China derzeit für den Energiepflanzenanbau eingesetzt. In Indien erfolgt der Anbau von Zuckerrohr überwiegend in Bewässerungskultur, so dass hier knapp 3500 l Wasser zur Herstellung von einem Liter Ethanol verwendet werden (de Fraiture et al., 2007). Die Nutzung von Bewässerungswasser für Energiepflanzen ist also ein wesentlicher Faktor für die regionale Beurteilung der Wasserkonkurrenz. Dies bedeutet, dass der Wasserbedarf von Energiepflanzen bei der Entscheidung für oder gegen den Anbau eine wesentliche Rolle spielen muss.

Berndes (2002) hat den Einfluss des Energiepflanzenanbaus in ausgewählten Ländern bis zum Jahr 2075 modelliert und dabei in zwei Szenarien zwischen Regenfeldbau und Bewässerungsfeldbau unterschieden (Abb. 5.6-1). Dabei zeigt sich, dass durch den Ausbau von Energiepflanzen in Kanada, Brasilien, Russland und Indonesien sowie einigen Ländern in Afrika südlich der Sahara keine kritischen Entwicklungen im Wassersektor zu erwarten sind – bei den getroffenen Modellannahmen. In einer Reihe von Ländern, die bereits heute von Wasserknappheit betroffen sind, ist jedoch eine Verschärfung der Lage absehbar, selbst wenn die Kultivierung von Energiepflanzen nur im Regenfeldbau erfolgt (z.B. Südafrika, Polen, Türkei, China und Indien). Schließlich gibt es eine Gruppe von Ländern, die durch den Energiepflanzenanbau über die kritische Schwelle einer Wasserentnahme von mehr als 25 % des verfügbaren Wassers rutscht (USA, Argentinien).

Die Integration von Energiepflanzen in Landnutzungsstrategien ist eine Herausforderung, bei der es vor allem um die Berücksichtigung der lokalen Effekte und Zielkonflikte geht: so kann eine Plantage mit schnellwachsenden Bäumen (KUP) aufgrund der hohen Evapotranspiration nicht nur die Wasserknappheit in einer Region vergrößern, sondern auch die Wasserversorgung von Anrainern verschlechtern und benachbarte Ökosysteme beeinträchtigen (Calder, 1999; Perrot-Maître und Davis, 2001; Berndes, 2008). Umgekehrt ist die verstärkte Nutzung marginaler Flächen (z.B. Weideland) für den nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen eine Option zur Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen um Wasser und

Tabelle 5.6-1
Regionale Unterschiede bei der Wassernutzung für Energiepflanzen.
Quelle: de Fraiture et al., 2008

Bioethanol	Bio-ethanol [Mio l]	Energie-pflanze	Genutz-tes Roh-material [Mio t]	Anbau-fläche [Mio ha]	Bioener-gieanteil an der An-baufläche [in%]	Wasser-verduns-tung [km³]	Bioener-gieanteil an der Wasserver-dunstung [in%]	Wasserent-nahme [km²]	Bioenergie-anteil der Wasserent-nahme zur Bewässe-rung [in%]
Brasilien	15.098	Zucker-rohr	167,8	2,4	5,0	46,02	10,7	1,31	3,5
USA	12.907	Mais	33,1	3,8	3,5	22,39	4,0	5,44	2,7
Kanada	231	Weizen	0,6	0,3	1,1	1,07	1,1	0,08	1,4
Deutsch-land	269	Weizen	0,7	0,1	1,1	0,36	1,2	–	0,0
Frankreich	829	Rüben	11,1	0,2	1,2	0,90	1,8	–	0,0
Italien	151	Weizen	0,4	0,1	1,7	0,60	1,7	–	0,0
Spanien	299	Weizen	0,8	0,3	2,2	1,31	2,3	–	0,0
Schweden	98	Weizen	0,3	0,0	1,3	0,34	1,6	–	0,0
UK	401	Rüben	5,3	0,1	2,4	0,44	2,5	–	0,0
China	3.649	Mais	9,4	1,9	1,1	14,35	1,5	9,43	2,2
Indien	1.749	Zucker-rohr	19,4	0,3	0,2	5,33	0,5	6,48	1,2
Thailand	280	Zucker-rohr	3,1	0,0	0,3	1,39	0,8	1,55	1,9
Indonesien	167	Zucker-rohr	1,9	0,0	0,1	0,64	0,3	0,91	1,2
Südafrika	416	Zucker-rohr	4,6	0,1	1,1	0,94	2,8	1,08	9,8
Ethanol Welt	**36.800**			**10,0**	**0,8**	**98,0**	**1,4**	**30,6**	**2,0**

bietet die Möglichkeit einer effizienteren Nutzung von Wasser, das den Pflanzen als Bodenfeuchte zur Verfügung steht („grünes Wasser"). Wenn mehrjährige Energiepflanzen auf marginalen Flächen kultiviert werden, dann könnte die wachsende Nachfrage nach Bioenergie auch ein Motor zur Verbreitung von Landnutzungssystemen mit einer verbesserten Wassernutzungseffizienz sein (Berndes, 2008). Da eine Reihe von Energiepflanzen dürreresistent und relativ wassereffizient sind, eröffnet dies Optionen zur Minderung der Nutzungskonkurrenz um Wasser zwischen Nahrungs- und Energiepflanzen. Pflanzen, die das ganze Jahr eine Fläche bedecken, nutzen nicht nur jeden Niederschlag, sie schützen auch die Böden vor Erosion und sorgen für Beschattung. So können beispielsweise agroforstwirtschaftliche Systeme die Wasserproduktivität erhöhen, weil der Anteil unproduktiver Niederschlagsverluste gesenkt wird, der sonst durch Abfluss oder durch Verdunstung verloren ginge (Ong et al., 2006). Um den Einfluss von Landnutzungspraktiken auf die Wasserverfügbarkeit in seiner Gesamtheit zu erfassen, sollte daher vor einem großflächigen Anbau von Energiepflanzen eine integrierte Analyse des Wassereinzugsgebietes durchgeführt werden, was jedoch bisher kaum geschieht (Rockström et al., 2007).

5.6.3 Fazit: Energiepflanzenanbau in nachhaltiges Boden- und Wassermanagement integrieren

Eine ambitionierte Ausweitung des Energiepflanzenanbaus und nicht angepasste Anbausysteme (Kap. 7.1) können den Nutzungsdruck auf die verfügbaren Ressourcen stark erhöhen. Dabei kann es zu Konkurrenzen zwischen dem Anbau von Nahrungs- und Energiepflanzen kommen, nicht nur um das verfügbare Land, sondern auch um das verfügbare Wasser. Derzeit stellt sich dies zwar noch nicht als großes

Abbildung 5.6-1
Entwicklung der Pro-Kopf Wasserentnahme und -verfügbarkeit in ausgewählten Ländern in einem Szenario bis 2075. Die schwarzen Punkte bezeichnen die Ausgangssituation im Jahr 1995. Der Pfeil der jeweils weiter von der Y-Achse entfernt ist, bezeichnet das Szenario bei dem Energiepflanzen nur im Regenfeldbau kultiviert werden. Der andere Pfeil zeigt das Szenario, bei dem Energiepflanzen bewässert werden.
Quelle: Berndes, 2002

Problem dar, aber bei einer anhaltenden Förderung nicht angepasster Anbausysteme kann sich dies in kritischen Regionen in kurzer Zeit zu einem erheblichen Problem entwickeln. Der Anbau von Energiepflanzen sollte nicht dazu führen, dass eine Region unter Wasserstress gerät oder dass die Bodendegradation die Bodenschutzleitplanke überschreitet (Kap. 3). Dann wäre der zu erwartende gesellschaftliche Nutzen aus Bioenergiepflanzen kleiner als der Schaden durch erhöhte Bodendegradation und geringere/zu geringe Wasserfügbarkeit.

Das Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture (IWMI, 2007), die SIWI-Studie (Lundqvist et al., 2008) und die GLASOD-Studie (Oldeman et al., 1991; Oldeman, 1992) machen deutlich: Die aktuelle Trends der globalen Wasser- und Bodennutzung zeigen in die falsche Richtung. Ohne Politikwandel wird der Weg in vielen Regionen in eine verschärfte Wasserkrise und zu erhöhter Bodendegradation führen. In bereits von Wasserstress oder Bodendegradation stark betroffenen Regionen darf der Anbau von Bioenergie diese negativen Umweltwirkungen nicht verstärken. Allerdings kann bei richtiger Technik der Anbau angepasster Energiepflanzen sogar zu einer Verbesserung der Lage führen. Langfristig bietet der Anbau von Energiepflanzen auf marginalen und degradierten Flächen eine strategische Option, weil restaurierte Flächen künftig für die Nahrungsproduktion zur Verfügung stehen. Die Auswahl des Anbausystems ist dabei von entscheidender Bedeutung, weil sie sich die Anbausysteme im Wasserbedarf und ihren Ansprüchen an die Bodenqualität teilweise erheblich unterscheiden (Kap. 7.1). Energiepflanzen ebenso wie übrigens auch Aufforstungen zur CO_2-Speicherung sind neue Triebkräfte im Landnutzungssektor, die möglicherweise große, derzeit aber kaum untersuchte Auswirkungen auf die Wassernutzung haben können (Berndes, 2002; Jackson et al., 2005). Bislang ist die Diskussion um den Ausbau der Bioenergie kaum mit der Wasserproblematik verknüpft. Daher muss erstens der Anbau von Energiepflanzen in eine regionale Strategie zur nachhaltigen Boden- und Wassermanagement integriert werden. Da es hierfür keine Pauschalrezepte gibt, sollten diese Strategien immer vor Ort und unter Berücksichtigung der lokalen Bedingungen entwickelt werden. Zweitens gibt es zum Zusammenhang von Energiepflanzenanbau und lokalen bzw. regionalen Wasserressourcen noch erhebliche Wissenslücken, die durch gezielte Forschungsvorhaben geschlossen werden sollten.

Modellierung des globalen Potenzials von Energiepflanzen 6

In den letzten 10.000 Jahren hat die wachsende Weltbevölkerung durch die Nutzung von Land für ihre Bedürfnisse weite Teile der festen Erdoberfläche grundlegend verändert. Zu den wichtigsten menschlichen Landnutzungsaktivitäten zählen die Rodung oder wirtschaftliche Nutzung von Wäldern, die Landwirtschaft sowie die Expansion von Siedlungsräumen (Foley et al., 2005). Allein die landwirtschaftlich genutzten Flächen, bestehend aus Acker- und Weideland, nehmen inzwischen etwa 40 % der Landfläche ein (Foley et al., 2005). Bereits heute wird knapp ein Viertel der potenziell zur Verfügung stehenden Nettoprimärproduktion der Erde von der Menschheit durch Ernte, Produktivitätsänderungen infolge von Landnutzung sowie Brände beeinflusst (Haberl et al., 2007).

Die menschliche Nutzung von Land steht damit in direkter Konkurrenz zur natürlichen Landbedeckung, die für die Erhaltung der Biodiversität, aber auch als Kohlenstoffspeicher im Klimasystem eine wichtige Rolle spielt. Die zunehmende Nutzung von Biomasse zur Energieerzeugung vergrößert den Druck auf bislang ungenutzte Flächen und steht auf bestehenden Ackerflächen in Konkurrenz zur Produktion von Nahrungsmitteln für die wachsende Weltbevölkerung (Kap. 5).

Vor diesem Hintergrund will der WBGU mit der von ihm in Auftrag gegebenen und in diesem Kapitel beschriebenen Modellierung (Beringer und Lucht, 2008) die Frage beantworten, wie groß das nachhaltige globale Potenzial für Energie aus Energiepflanzen bis Mitte des Jahrhunderts ist. Dazu soll die für Bioenergie zur Verfügung stehende pflanzliche Primärproduktion unter Berücksichtigung von Leitplanken für Ernährung, Umweltschutz sowie Klima- und Bodenschutz (Kap. 3) geographisch explizit ermittelt werden. Dabei werden die Leitplanken aus Kapitel 3 mit Hilfe einfacher Szenarien in Ausschlussflächen übersetzt, auf denen der Anbau von Energiepflanzen im Sinne des WBGU nicht nachhaltig wäre.

Inwieweit dieses globale nachhaltige Potenzial für die Nutzung von Bioenergie aus dem Anbau von Energiepflanzen verwirklicht werden kann, hängt maßgeblich von den wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Voraussetzungen der Regionen ab, in denen den WBGU-Kriterien entsprechende Anbauflächen zur Verfügung stehen. Daher stellt der WBGU seiner Einschätzung des globalen Potenzials am Ende des Kapitels eine detaillierte sozio-ökonomische Analyse der entsprechenden Länder voran.

Bevor das Modell für die vom WBGU in Auftrag gegebene Expertise und ihre Ergebnisse im Detail beschrieben werden, soll ein Überblick über ähnliche Abschätzungen des globalen Bioenergiepotenzials aus der jüngeren Literatur gegeben werden.

6.1 Bisherige Abschätzungen zum Potenzial der Bioenergie

6.1.1 Bioenergiepotenziale in der neueren Literatur

Bei der Berechnung des globalen Potenzials der Bioenergie wird in der Literatur wie bei anderen Energieträgern auch zwischen theoretischem, technischem, ökonomischem und nachhaltigem Potenzial unterschieden (s. Kasten 6.1-1).

In seinem Energiegutachten schätzt der WBGU das globale nachhaltige Potenzial der Bioenergie auf etwa 104 EJ pro Jahr (WBGU, 2003a), also etwa 20 % des derzeitigen globalen Primärenergiebedarfs von etwa 480 EJ pro Jahr (GBEP, 2007). Für das Jahr 2050 ergibt sich für den exemplarischen Energiepfad des WBGU (WBGU, 2003a) nach der Wirkungsgradmethode (Kasten 4.1-1) ein Beitrag der Bioenergie zum globalen Primärenergiebedarf von etwa 10 %; für die Substitutionsmethode (Kasten 4.1-1) aufgrund des hohen Anteils von Wind- und Solarenergie ein etwas geringerer Beitrag von 7 %. Die heutige Produktion von Bioenergie beläuft sich im Jahr 2005 auf etwa 47 EJ (GBEP, 2007), größtenteils in Form von traditioneller Bioenergienutzung (Smeets et al., 2007). Die Abschätzung des WBGU berücksichtigt für die einzelnen Kontinente die für Biomassenutzung zur Verfügung stehenden Flächen, wobei Nutzflächen

Kasten 6.1-1

Potenzialdefinitionen

Zur Diskussion der Potenziale verschiedener Energieträger werden meist folgende Begriffe zugrunde gelegt: theoretisches Potenzial, technisches Potenzial, wirtschaftliches und nachhaltiges Potenzial (WBGU, 2003a). Im Rahmen dieses Gutachtens werden dabei folgende Definitionen unterschieden:

THEORETISCHES POTENZIAL
Das theoretische Potenzial bezeichnet die physikalische Obergrenze der aus einer bestimmten Quelle zur Verfügung stehenden Energie. Im Fall der Sonnenenergie wäre dies die gesamte, auf die jeweils betrachtete Fläche einfallende solare Strahlung. Dieses Potenzial berücksichtigt also insbesondere keine Flächennutzungseinschränkungen und keine Wirkungsgrade der Konversionstechnologien.

TECHNISCHES POTENZIAL
Das technische Potenzial ist technologiespezifisch definiert und leitet sich über den Jahreswirkungsgrad der jeweiligen Umwandlungstechnologie aus dem theoretischen Potenzial ab. Zusätzlich werden Einschränkungen bezüglich der für die Energiegewinnung realistischerweise zur Verfügung stehenden Flächen berücksichtigt. Die bei der Flächenauswahl zugrunde gelegten Kriterien werden in der Literatur nicht einheitlich gehandhabt. Technische, strukturelle und ökologische Restriktionen sowie gesetzliche Vorgaben werden hierbei zum Teil berücksichtigt. Die Höhe des technischen Potenzials der verschiedenen Energiequellen ist demnach kein scharf definierter Wert, sondern von zahlreichen Randbedingungen und Annahmen abhängig.

WIRTSCHAFTLICHES POTENZIAL
Dieses Potenzial bezeichnet den unter den ökonomischen Rahmenbedingungen (zu einem bestimmten Zeitpunkt) wirtschaftlich nutzbaren Anteil des technischen Potenzials. Für Biomasse werden hierunter beispielsweise jene Mengen verstanden, die in Konkurrenz mit anderen Produkten und Landnutzungen wirtschaftlich erschließbar sind. Die ökonomischen Rahmenbedingungen sind insbesondere durch politische Maßnahmen deutlich beeinflussbar.

NACHHALTIGES POTENZIAL
Dieses Potenzial einer Energiequelle berücksichtigt alle Dimensionen der Nachhaltigkeit. Hierzu müssen in der Regel verschiedene ökologische und sozioökonomische Aspekte gegeneinander abgewogen und bewertet werden. Die Abgrenzung des nachhaltigen Potenzials ist unscharf, da je nach Autor auch beim technischen oder wirtschaftlichen Potenzial bereits ökologische Aspekte berücksichtigt werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass die hier beschriebenen Potenzialdefinitionen aufgrund sehr unterschiedlicher Definitionen verschiedener Autoren nicht notwendigerweise eine schrittweise Verschärfung in der obigen Reihenfolge implizieren. So bestimmt die in diesem Kapitel beschriebene, vom WBGU in Auftrag gegebene Modellierung beispielsweise ein „technisches nachhaltiges Potenzial“, da eine gleichzeitige Bewertung der Wirtschaftlichkeit aufgrund fehlender integrierter Modelle leider nicht erfolgen kann.

zur Nahrungsmittelproduktion sowie Schutzflächen zur Bewahrung der biologischen Vielfalt sowie der Ökosystemfunktionen ausgeschlossen wurden. Frühere Studien zum globalen Potenzial von Bioenergie kommen zu einer weiten Spanne von Ergebnissen. So zeigt ein Vergleich von Studien zum Beitrag der Bioenergie in künftigen Energiesystemen, dass Schätzungen für das Jahr 2050 von 47 EJ pro Jahr bis 450 EJ pro Jahr reichen (Berndes et al., 2003). Der vergleichsweise niedrige Wert des WBGU ist auf die angesprochene Berücksichtigung von konkurrierenden Landnutzungsansprüchen sowie auf die Annahme zum Teil unrealistisch hoher Erträge anderer Abschätzungen zurückzuführen (WBGU, 2003a). Im Folgenden soll eine Auswahl neuerer Studien zum globalen Bioenergiepotenzial diskutiert werden. Bei allen Potenzialzahlen handelt es sich um den Bruttoenergiebetrag, d.h. eventuelle Umwandlungsverluste bei der Konversion zur Endenergie sind nicht berücksichtigt.

Hoogwijk et al. (2003) werten bestehende Studien aus und untersuchen den Einfluss verschiedener Faktoren auf den Anteil der Bioenergie aus unterschiedlichen Quellen an der globalen Energieerzeugung im Jahr 2050. Die zugrunde liegenden Studien variieren für ihre Abschätzung den zukünftigen Nahrungsbedarf der Menschheit (beeinflusst von Bevölkerungsentwicklung sowie Ernährungsgewohnheiten), unterschiedliche Anbausysteme für Nahrungs- und Futtermittel (intensiver und extensiver Anbau) sowie unterschiedliche Annahmen über Produktivität, Landverfügbarkeit sowie Bedarf für stoffliche Biomassenutzung. Nur bereits bestehende Naturschutzflächen werden von der Bioenergieproduktion ausgenommen. Die resultierenden Abschätzungen für das Jahr 2050 spannen einen weiten Bereich von möglichen Werten von 33–1.135 EJ pro Jahr auf. Aufschlussreich ist die Verteilung dieses Bioenergiepotenzials auf die verschiedenen Quellen: Schätzungen für Bioenergieproduktion auf bestehenden landwirtschaftlichen Flächen (nach Deckung des Nahrungsmittelbedarfs der wachsenden Weltbevölkerung) reichen von 0–988 EJ pro Jahr (der Wert 0 kommt unter der Annahme zustande, dass alle bestehenden Agrarflächen für die Nahrungsmittelproduktion benötigt werden), auf degradierten Böden von 8–110 EJ pro Jahr sowie aus biogenen Abfällen und Reststoffen (land- und forstwirtschaftliche Reste, Dung, organische Abfälle) von 62–108 EJ pro Jahr. Werte für die stoffliche Nutzung von Biomasse reichen von 83–116 EJ pro Jahr (Hoogwijk et al., 2003). Diese Zahlen machen die Bedeutung von Annahmen über den zukünftigen Flächenbedarf zur Sicherung der Ernährung der Menschheit deutlich. Sehr

hohe Potenziale (etwa im Bereich von 1.000 EJ pro Jahr) für den Beitrag der Bioenergie zur Weltenergieversorgung sind nur dann möglich, wenn man davon ausgeht, dass bislang für die Nahrungsmittelproduktion genutzten Flächen durch Effizienzsteigerungen oder wenig flächenintensive Ernährungsgewohnheiten frei werden.

Dies zeigt auch die Studie von Wolf et al. (2003), die auf den für Nahrungs- sowie Futtermittel und Biomasse verfügbaren Landflächen basiert und den Einfluss von landwirtschaftlicher Produktionstechnik und Ernährungsgewohnheiten untersucht. Dabei wird allerdings nicht nach verschiedenen Energiepflanzen und deren Erträgen auf unterschiedlichen Böden differenziert. Bei einer Beschränkung auf das derzeit landwirtschaftlich genutzte Land werden für ein mittleres Bevölkerungswachstum und eine moderate Ernährungsweise globale technische Bioenergiepotenziale von 59 EJ pro Jahr (extensive Bewirtschaftung für Nahrungs-, Futtermittel und Biomasse) bis 417 EJ pro Jahr (intensive Bewirtschaftung für Nahrungs-, Futtermittel und Biomasse) erreicht. Wird nicht nur das bestehende Agrarland, sondern die gesamte potenziell verfügbare Agrarfläche beansprucht, steigen diese Werte auf 257 bzw. 790 EJ pro Jahr (Wolf et al., 2003). Interessant ist der Einfluss der Ernährungsgewohnheiten: Bei extensiver Bewirtschaftung für Nahrungs-, Futtermittel und Biomasse auf den bestehenden Flächen sinkt das Potenzial bei einer Ernährung, die von viel Fleisch und Milchprodukten geprägt ist und damit sehr flächenintensiv ist, von 59 EJ pro Jahr auf 0 EJ pro Jahr und steigt bei weniger flächenintensiver Ernährung auf 194 EJ pro Jahr.

Field et al. (2008) argumentieren, dass ein nachhaltiger Anbau von Energiepflanzen nur auf stillgelegten, ehemals für Ackerbau oder Weidewirtschaft genutzten Brachflächen möglich ist, soweit diese nicht inzwischen besiedelt oder aufgeforstet wurden. Damit schließen die Autoren implizit Anbauflächen für Nahrungs- und Futtermittel, bestehende Schutzgebiete sowie Wildnisgebiete aus, die sie für die Sicherung der Ernährung der Menschheit sowie für den Naturschutz für unabdingbar halten. Basierend auf dieser Flächenabschätzung und unter Berücksichtigung der räumlich aufgelösten klimatologischen Nettoprimärproduktion auf diesen Flächen gelangen sie zu einem nach diesen Kriterien nachhaltigen globalen Potenzial für den zusätzlichen Anbau von Energiepflanzen von 27 EJ pro Jahr (Field et al., 2008).

Nach einer weiteren Studie könnte die nachhaltige Erzeugung von Bioenergie aus der extensiven Nutzung von Grasland hoher Biodiversität auf brachliegenden und degradierten Flächen mit etwa 45 EJ pro Jahr zur globalen Energieerzeugung beitragen. Eine derartige Nutzung hätte weiterhin einen geringen Einsatzes von Chemikalien zur Düngung und zum Pflanzenschutz, eine gute Kohlenstoffspeicherung im Boden und eine höhere biologische Vielfalt zur Folge (Tilman et al., 2006). Ohne Beschränkung auf den Typ der angebauten Energiepflanzen kommt eine neue Studie zu einem ähnlichen Potenzial von 32–41 EJ pro Jahr auf brachliegenden und degradierten Flächen (Campbell et al., 2008).

Smeets et al. (2007) untersuchen das globale Bioenergiepotenzial im Jahr 2050 für drei Arten von Biomasse (Energiepflanzenanbau, biogenen Abfällen und Reststoffe aus Land- und Forstwirtschaft sowie zusätzliche Erträge aus der Forstwirtschaft) ohne Berücksichtigung des Klimawandels. Der Schutz biologischer Vielfalt beschränkt sich in dieser Studie auf den Ausschluss von bestehenden Schutzgebieten, Wäldern sowie Ödland (*barren land),* Buschland und Savannen. Unter verschiedenen Annahmen für Ertragssteigerungen in der Nahrungsmittelproduktion ermitteln die Autoren technische Potenziale von 215–1.272 EJ pro Jahr für Energiepflanzenanbau auf überschüssigen Agrarflächen, wobei die Annahmen für den niedrigsten Wert bereits recht optimistisch erscheinen (Faaij, 2008). Bei den höheren Werten werden große technologische Fortschritte bei der Nahrungsmittelproduktion sowie Bewässerungslandwirtschaft angenommen. Für die Energiebeiträge im Jahr 2050 aus der Verwertung von biogenen Abfällen und Reststoffen sowie aus zusätzlichen Erträgen der Forstwirtschaft werden Werte von 76–96 EJ pro Jahr bzw. 74 EJ pro Jahr berechnet (Smeets et al., 2007).

Hoogwijk et al. (2005) untersuchen das Energiepotenzial von Kurzumtriebsplantagen holziger Biomasse im Zeitraum 2050 bis 2100 für die vier IPCC-Szenarien A1, A2, B1 und B2. Die unter Naturschutz gestellten Flächen, die nicht für den Biomasseanbau genutzt werden, werden für die A-Szenarien mit 10 %, für die B-Szenarien mit 20 % der globalen Landfläche angenommen. Annahmen über Weltbevölkerung, Ernährungsgewohnheiten und technologischer Entwicklung beruhen auf den Storylines der IPCC-Szenarien. Das technische Potenzial für Bioenergieerzeugung aus der Bewirtschaftung aufgegebener Landwirtschaftsflächen wird für 2050 mit 130–410 EJ pro Jahr, für 2100 mit 240–850 EJ pro Jahr angegeben. Für Flächen, die bislang nicht landwirtschaftlich genutzt werden, werden nach Abzug von Grasländern, Waldgebieten, städtischer Flächen sowie bereits heute bestehenden Naturschutzflächen Potenziale von 35–245 EJ pro Jahr und 35–265 EJ pro Jahr für 2050 bzw. 2100 berechnet (Hoogwijk et al., 2005; Smeets et al., 2007).

In ihrem World Energy Outlook 2007 gibt die International Energy Agency (IEA) den jährlichen globalen Primärenergieverbrauch aus Biomasse und Reststoffen im Jahr 2030 für ihre vier Szenarien mit

68 EJ (Reference Scenario), 73 EJ (Alternative Policy Scenario), 69 EJ (High Growth Scenario) bzw. 82 EJ (450ppm Stabilisation Case) an (IEA, 2007a). Dieses wirtschaftliche Potenzial wurde mit Hilfe eines ökonomischen Energiesystemsmodells unter Berücksichtigung verschiedener Politikszenarien berechnet.

Eine vom Verband der Chemischen Industrie (VCI) in Auftrag gegebene Studie des Instituts für Energie und Umweltforschung Heidelberg (IFEU) beziffert das globale Bioenergiepotenzial im Jahr 2050 auf 240–620 EJ pro Jahr. Davon entfallen 215–420 EJ pro Jahr auf den Anbau von Energiepflanzen auf überschüssigen Anbauflächen, wobei der zukünftige Bedarf für stoffliche Nutzung von Biomasse berücksichtigt wurde, und extreme Szenarien für Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft ausgeschlossen wurden. Daneben tragen noch Holzzuwächse mit 0–45 EJ pro Jahr sowie alle Arten von biogenen Abfällen und Reststoffen mit 25–155 EJ pro Jahr zum globalen Potenzial bei (IFEU, 2007).

Der *Round Table on Sustainable Development* der OECD schätzt das nachhaltige globale Potenzial der Bioenergie im Jahr 2050 auf insgesamt 245 EJ pro Jahr ab (Doornbosch und Steenblik, 2007). Von diesem Potenzial entfallen 109 EJ pro Jahr auf den Anbau von Energiepflanzen sowie 136 EJ pro Jahr auf die energetische Nutzung von Reststoffen aus Land- und Forstwirtschaft sowie Dung und organischen Abfällen. Die für den Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung stehenden Flächen schätzen die Autoren auf 440 Mio. ha. Dabei nehmen sie bislang für die Nahrungsmittelproduktion verwendete Flächen, zusätzliche 200 Mio. ha für die Sicherung der Ernährung der Weltbevölkerung sowie Waldflächen vom Anbau aus, reservieren aber keine Flächen für den Naturschutz.

Für ein „alternatives Szenario“ einer klimafreundlichen künftigen Energieerzeugung gibt eine von Greenpeace und dem European Renewable Energy Council (EREC) in Auftrag gegebene Studie den nachhaltigen Beitrag der Bioenergie zur globalen Energieerzeugung im Jahr 2050 mit etwa 105 EJ pro Jahr an (Greenpeace und EREC, 2007).

6.1.2 Zusammenfassung und Bewertung

Die Potenzialabschätzungen für den Beitrag der Bioenergie zum globalen Energieverbrauch sind in Tabelle 6.1-1 zusammengefasst. Obwohl sich die angegebenen Potenziale mit einer Spanne von etwa 30–1.200 EJ pro Jahr zum Teil sehr stark unterscheiden, lassen sich aus diesem Literaturvergleich doch einige Trends identifizieren, die sich im Rahmen der zum Teil großen Unsicherheiten zu einem einigermaßen konsistenten Bild fügen.

Die größte Unsicherheit resultiert aus dem ungewissen Flächenbedarf für die künftige Ernährung der Weltbevölkerung, der nicht nur vom Bevölkerungswachstum, sondern auch von der Entwicklung der Ernährungsgewohnheiten und dem technologischen Fortschritt sowie dem Grad der Intensivierung der Agrarproduktion abhängt (Kap. 5.2). Sehr hohe Bioenergiepotenziale in der Größenordnung von 1.000 EJ pro Jahr sind nur dann technisch realisierbar, wenn bislang für die Nahrungsmittelproduktion genutzte Flächen durch Effizienzsteigerungen oder weniger flächenintensive Ernährungsgewohnheiten für den Anbau von Energiepflanzen nutzbar werden. Hier stellt sich die Frage, ob für die Sicherung der Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung nicht eher noch zusätzliche Anbauflächen nötig sein könnten, wie dies beispielsweise die FAO prognostiziert (FAO, 2003a).

Schließt man daher die Verwendung von bislang für die Nahrungsmittelproduktion verwendeten Flächen aus, dann verbleiben für den Anbau von Energiepflanzen nur marginale Flächen (Kasten 4.2-1), mit einem sehr unsicheren Energiepotenzial von etwa 30–200 EJ pro Jahr für eine nicht bewässerte und nicht stark intensivierte Anbauweise.

Zu diesem Potenzial aus dem Anbau von Energiepflanzen kommen nach den hier vorgestellten Studien noch zusätzliche Erträge aus der Forstwirtschaft mit ca. 80 EJ pro Jahr sowie biogene Abfälle und Reststoffe (hierzu zählen Pflanzenreste aus der Land- und Forstwirtschaft, Dung und organische Abfälle) mit ca. 80 EJ pro Jahr.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die meisten dieser Abschätzungen das technische Potenzial betreffen, das wirtschaftliche oder gar nachhaltige Potenzial kann folglich teilweise noch darunter liegen. Auch sind Nutzungskonkurrenzen zum Teil nicht berücksichtigt. So schätzt der WBGU das Bioenergiepotenzial aus Zuwächsen in der Forstwirtschaft aufgrund der steigenden Nachfrage nach Holzprodukten als gering ein (Kap. 5.3.2). Die Kaskadennutzung dieser stofflichen Produkte entschärft dieses Problem aufgrund der unvermeidlichen Verluste nur teilweise (Kap. 5.3.3). Daher nimmt der WBGU ein nachhaltiges Potenzial von 0 EJ pro Jahr aus Waldzuwächsen an, weist aber darauf hin, dass in diesem Bereich noch Forschungsbedarf besteht.

Zum nachhaltigen Bioenergiepotenzial aus der Verwertung von biogenen Abfällen und Reststoffen gibt es kaum Studien. In seinem Energiegutachten (WBGU, 2003a) schätzt der WBGU dieses nachhaltige Potenzial auf insgesamt 67 EJ pro Jahr. Auf der Basis neuerer Studien erachtet der WBGU für das globale technische Potenzial aus biologischen Abfall-

Tabelle 6.1-1
Technisches (TP), wirtschaftliches (WP) und nachhaltiges Potenzial (NP) der Bioenergie aus verschiedenen Studien.
Quelle: WBGU

	Potenzial, Jahr	Waldzuwachs	Bioenergiepflanzenanbau auf			Reststoffe aus			Summe
			Äckern	Brachland	degradierten Flächen	Landwirtschaft	Forstwirtschaft	Sonstigem	
Studien, die alle Beiträge zum Bioenergiepotenzial betrachten									
WBGU (2003a)	NP	0	37			17	42	8	104
Hoogwijk et al. (2003)	TP, 2050	0	0–988		8–110	10–32	42–48[2]	10–28	33–1135
Smeets et al. (2007)	TP, 2050	74	215–1272			76–96			365–1442
IEA (2007a)	WP, 2030								68–82[4]
IFEU (2007)	WP, 2050	0–45	200–390	15–30		15–70	5–30	5–55	240–620
OECD (2007)	NP, 2050		109			35	91	10	245
Faiij (2008)	NP, 2050	60–100	120[6]	70[6]		40–170			430–600[6]
Studien zum Potenzial aus dem Anbau von Energiepflanzen									
Wolf et al. (2003)	TP, 2050		0–790[1]						
Hoogwijk et al. (2005)	TP, 2050			130–410	35–245				
	TP, 2100			240–850	35–265				
Tilman et al. (2006)	NP			45[3]					
Campbell et al. (2008)	NP			32–41					
Field et al. (2008)	NP			27					
WBGU (2008)	NP, 2050			34–120[7]					

[1] je nach Ernährungsgewohnheiten und Intensivierungsgrad der Agrarproduktion
[2] inklusive 32 EJ pro Jahr aus der Kaskadennutzung von Biomaterialien
[3] extensiv genutztes Grasland hoher Biodiversität
[4] für die vier IEA-Szenarien (Reference Scenario, Alternative Policy Scenario, High Growth Scenario, 450 ppm Stabilisation Case)
[5] Alternatives Szenario
[6] zusätzliche 140 EJ pro Jahr im Bioenergiepflanzenanbau werden durch technologische Fortschritte in der Landwirtschaft angenommen
[7] Klimamodell HadCM3, Emissionsszenario A1B, je nach Leitplankenszenario und Bewässerung

und Reststoffen aus der Land- und Forstwirtschaft sowie Dung einen Wert von 80 EJ pro Jahr für realistisch. Davon ist allerdings nur ein Teil einsetzbar, da Wirtschaftlichkeitsüberlegungen und die Prüfung der Nachhaltigkeit bei diesen Potenzialschätzungen zum Teil noch nicht berücksichtigt sind. So darf beispielsweise aus Gründen des Bodenschutzes die Entnahme von Reststoffen aus land- oder forstwirtschaftlichen Ökosystemen aber nur eingeschränkt erfolgen, da sonst dem Boden zu viel organische Substanz entzogen würde (Münch, 2008). Eine grobe Einschätzung lässt es realistisch erscheinen, das technische nachhaltige Potenzial mit etwa 50 EJ pro Jahr anzusetzen, von dem etwa die Hälfte wirtschaftlich realisierbar sein dürften. Der WBGU weist darauf hin, dass dieser Wert aufgrund offener Forschungsfragen zur nachhaltigen und wirtschaftlichen Nut-

zung von biogenen Abfällen und Reststoffen als sehr unsicher anzusehen ist.

6.2 Globale Landnutzungsmodelle: Stand der Wissenschaft

6.2.1 Auswirkungen und Einflussfaktoren menschlicher Landnutzung

Änderungen der Landbedeckung der Erde durch den Menschen beeinflussen das Klima über die Änderung der Reflektivität (Albedo) der Erdoberfläche sowie über ihre Wirkung auf den Kohlenstoffkreislauf (Lambin et al., 2003). So zeigen Schätzungen, dass etwa 35 % der anthropogenen Kohlendioxidemissionen seit 1850 durch Landnutzung verursacht wurden (Foley et al., 2005). Darüber hinaus beeinflussen menschliche Landnutzung und Landnutzungsänderungen den Wasserkreislauf, den Nährstoffkreislauf, die Biodiversität sowie die Bodenqualität (Lambin et al., 2003).

Umgekehrt wirken sich naturräumliche Variablen wie Klima, Wasserverfügbarkeit und Bodenqualität und ihre Veränderung nicht nur auf die natürliche Vegetation aus, sondern bilden zusammen mit politischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Faktoren die wesentlichen Ursachen für Landnutzungsänderungen (Heistermann et al., 2006).

Modelle für Landnutzung und Landnutzungsänderungen versuchen, dieses komplexe Gefüge mit Hilfe numerischer Methoden zu studieren. Im Folgenden soll ein Überblick über verschiedenen Typen von Landnutzungsmodellen sowie ihre charakteristischen Stärken und Schwächen gegeben werden.

6.2.2 Typen von globalen Modellen von Landnutzung und Landnutzungsänderung

Grundsätzlich muss zwischen der Beschreibung der aktuellen Landnutzung sowie von Landnutzungsänderungen unterschieden werden. Die Modellierung der aktuellen oder zukünftigen *Landnutzung* zielt beispielsweise darauf ab, die Auswirkungen von Verschiebungen und Flächenexpansionen der landwirtschaftlichen Flächen auf Kohlenstoff- und Wasserkreislauf zu quantifizieren bzw. die Effekte des Klimawandels auf die pflanzliche Produktivität abzuschätzen. Die zugrunde liegenden Landnutzungs*änderungen* werden in diesem Fall mit Hilfe externer Daten vorgegeben.

Modelle der *Landnutzungsänderung* hingegen, versuchen diejenigen – meist sozioökonomischen Prozesse – zu berücksichtigen, welche die zukünftige Nutzung der Biosphäre durch den Menschen wahrscheinlich bestimmen werden.

Obwohl Modelle für die globale Landnutzung und ihre Veränderung nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden können (Verburg et al., 2004), bietet sich daher eine Einteilung nach ihrer grundlegenden Methodik an (Heistermann et al., 2006):

- *Geographische Modelle* versuchen, die räumliche Verteilung von Landnutzungstypen und ihre Wechselwirkung unter Berücksichtigung naturräumlicher Variablen wie Bodenart und -qualität, Klima und Wasserverfügbarkeit sowie der für die Vegetation wichtigen Stoffflüsse (insbesondere Kohlenstoff) darzustellen. Dadurch sind sie insbesondere in der Lage, fundamentale naturräumliche Beschränkungen des Angebots landwirtschaftlicher Produkte wiederzugeben, können aber Landnutzungsänderungen aufgrund von sozioökonomischen Einflüssen (z.B. Änderung der Nachfrage nach bestimmten Produkten) oft nur unzureichend modellieren.
- *Ökonomische Modelle* hingegen konzentrieren sich auf die sozioökonomischen Antriebsfaktoren von Landnutzung und Landnutzungsänderungen und damit auf die Nachfrageseite der Weltwirtschaft. Hier spielen beispielsweise demographische und kulturelle Faktoren, Änderungen der Ernährungsgewohnheiten, politische Förderung bestimmter landwirtschaftlicher Produkte oder die Struktur des Weltmarktes eine wichtige Rolle. Ökonomische Modelle weisen jedoch bei der Beschreibung wichtiger naturräumlicher Limitierungen der Agrarproduktion (z.B. durch den Klimawandel oder die Böden) zum Teil Defizite auf.
- *Integrierte Modelle* schließlich versuchen, die Stärken beider Ansätze zu verbinden und damit zu einer realistischeren Darstellung von Veränderungen menschlicher Nutzung von Landflächen zu gelangen, die ja sowohl von naturräumlichen als auch von sozioökonomischen Faktoren beeinflusst werden.

6.3 Beschreibung des Modells

Für die Modellierung in diesem Gutachten wird das Modell LPJmL (LPJ managed Land) verwendet (Bondeau et al., 2007), das auf dem dynamischen globalen Vegetationsmodell LPJ (Lund-Potsdam-Jena) basiert (Sitch et al., 2003). Es handelt sich um ein Modell der terrestrischen Landnutzung in Kombination mit Szenarien der potenziell verfügbaren

Flächen für den Biomasseanbau. Die ökonomischen Triebkräfte der zukünftigen Landnutzung werden mit Hilfe der Szenarien nur implizit berücksichtigt.

Auf der Basis von prozessorientierten Darstellungen der wichtigsten biogeochemischen, biophysikalischen und biogeographischen Mechanismen ist LPJmL in der Lage die großräumige Verteilung der verschiedenen Vegetationstypen zu simulieren. Daraus ergeben sich eine Reihe von Parametern, wie die pflanzliche Produktivität und die Verteilung und Dynamik von Kohlenstoff- und Wasserspeichern in Vegetation und Böden. In einem solchen dynamischen Modell reagiert die räumliche Verteilung der Pflanzen auf Veränderungen der vorherrschenden Witterungsverhältnisse und lässt so Rückschlüsse auf mögliche großskalige Vegetationsverschiebungen zu, die in Folge eines weiter fortschreitenden Klimawandels eintreten können.

6.3.1 Im Modell verwendete Methoden

6.3.1.1 Modellierung der pflanzlichen Produktivität

LPJmL wurde für die Analyse der Wechselwirkungen von Klima und Biosphäre auf der globalen Skala entwickelt, was bestimmte Vereinfachungen und Generalisierungen bei der Modellkonstruktion notwendig macht. So wird die Vielfalt pflanzlicher Lebens- und Wuchsformen in LPJ in Form von neun pflanzenfunktionalen Typen (PFTs) zusammengefasst, welche durch Photosynthesestoffwechsel (C3 oder C4), Phänologie (laubwerfend oder immergrün), Wuchsform (holzig oder krautig) und Lebensdauer (ein- oder mehrjährig) charakterisiert sind. Klimatische Standortbedingungen sowie der Wettbewerb um Licht und Wasser bestimmen die Dynamik der Vegetation in Zeit und Raum. Die Berechnungen von Bruttoprimärproduktion (GPP) und pflanzlicher Respiration folgen einem modifizierten Farquhar-Collatz-Ansatz (Farquhar et al., 1980; Collatz et al., 1992) und sind über die stomatäre Leitfähigkeit direkt an den Wasserhaushalt der Pflanzen gekoppelt (Gerten et al., 2004). Dadurch wird die Auswirkung von Trockenheit auf Photosyntheseleistung und Transpiration realistisch abgebildet. Verschiedene allometrische und funktionale Regeln bestimmen die Allokation des assimilierten Kohlenstoffs in den vier pflanzlichen Speicherorganen Blätter, Kernholz, Splintholz und Feinwurzeln (Shinozaki et al., 1964). Feuerereignisse verändern den Kohlenstoffhaushalt eines Ökosystems sehr stark und sind in bestimmten Biomen charakteristische Elemente der Vegetationsentwicklung. In LPJmL wird ihr Auftreten in Abhängigkeit von verfügbarem Brennmaterial und vorherrschender Bodenfeuchte abgeschätzt (Thonicke et al., 2001). Abgestorbene Biomasse gelangt in den Boden, wo der Abbau organischer Substanz mit Hilfe einer modifizierten Arrhenius-Gleichung (Foley, 1995) unter Berücksichtigung von Bodentemperatur (Lloyd und Taylor, 1994) und Feuchtigkeit bestimmt wird. Für den CO_2-Düngungseffekt wurde ein Wert von 20–30 % angenommen.

6.3.1.2 Landwirtschaft in LPJmL

Zusätzlich zur Simulation von Verteilung und Dynamik der potenziell natürlichen Vegetation ist LPJmL auch in der Lage landwirtschaftlich genutzte Flächen darzustellen (Bondeau et al., 2007). Neben biophysikalischen und biogeochemischen Prozessen berechnet das Modell die Produktivität und Erträge der wichtigsten Feldfrüchte, deren Darstellung ebenfalls dem Ansatz der generischen Pflanzentypen folgt. Unterschieden werden 13 so genannte „crop functional types“ (CFTs), 11 Ackerfrüchte und 2 Grasarten. Für alle CFTs kann im Modell der Anbau sowohl auf bewässerten als auch auf unbewässerten Flächen erfolgen.

6.3.1.3 Modellierung des Anbaus von Energiepflanzen

Für die Darstellung von Biomassepflanzungen im Modell wurden drei zusätzliche Pflanzentypen definiert und parametrisiert, zwei schnell wachsende Bäume und ein hochproduktives Gras. Die Bäume unterscheiden sich hinsichtlich ihrer potenziellen Anbaugebiete in einen tropischen und einen außertropischen Typ. Die Parametrisierung der außertropischen Baumart folgte der Wuchsdynamik und Ertragsleistung von Pappel- und Weidearten, die aufgrund ihrer Wuchseigenschaften als Energiepflanzen geeignet sind. Für entsprechende Anpflanzungen wird eine Bestandesdichte von etwa 15.000 Individuen pro Hektar angenommen. Der tropische Baumtyp charakterisiert kommerziell angebaute Eukalyptusarten und wächst im Modell in Beständen von 2.000 Individuen pro ha. Beide Baumarten werden im Kurzumtrieb bewirtschaftet und alle 8 Jahre abgeerntet. Dabei werden 90 % der oberirdischen Biomasse entfernt, die unterirdische Wurzelmasse bleibt komplett erhalten, was einen realistischen Stockausschlag im nächsten Jahr ermöglicht.

Neben holziger Biomasse wird auch der Anbau von äußerst produktiven C4-Gräsern wie Chinaschilf

(Miscanthus) oder Rutenhirse *(Panicum)* in großem Umfang erprobt. Besonders interessant ist dabei, dass bestimmte Arten dieser Pflanzen auch bei niedrigen Temperaturen eine hohe Photosyntheseaktivität aufrechterhalten können. Die Ernte findet jährlich nach dem Ende der Wachstumsperiode statt und erfasst ebenfalls 90 % der oberirdischen Biomasse.

6.3.1.4
Vergleich mit gemessenen Daten

Das wichtigste Qualitätskriterium für globale Vegetationsmodelle sind Vergleiche mit realen Messwerten. LPJmL wurde unter Verwendung verschiedener, unabhängiger Beobachtungsdaten umfangreich überprüft. So konnte gezeigt werden, dass das Modell in der Lage ist, die großräumige Verteilung und Dynamik der terrestrischen Vegetation korrekt abzubilden (Lucht et al., 2002; Sitch et al., 2003; Hickler et al., 2004; Erbrecht und Lucht, 2006). Auch die Simulation von Bodenfeuchte, Abfluss und Transpiration und deren saisonale Variabilität stimmt weitgehend mit gemessene Werten überein (Wagner et al., 2003; Gerten et al., 2004). Der Vergleich von landwirtschaftlichen Erträgen mit FAO Statistiken zeigt, dass LPJmL in der Lage ist, die geographische Differenzierung der Ertragsniveaus korrekt wiederzugeben (Bondeau et al., 2007).

Eine Validierung der simulierten Biomasseanpflanzungen ist schwierig, da der Anbau von Zellulosepflanzen bisher weitgehend auf spezielle Versuchsflächen unter zumeist optimalen Wuchsbedingungen begrenzt ist. Vergleiche zeigen, dass der modellierte Biomasseertrag von Rutenhirse (*Panicum*) sowie von Kurzumtriebsplantagen mit schnell wachsenden Baumarten in einem Bereich liegt, der bereits heute unter fortschrittlicher Bewirtschaftung zu erreichen ist.

6.3.1.5
Berechnung des globalen Bioenergiepotenzials

Aus der Kombination der verschiedenen Ausschlusskriterien aufgrund der Leitplanken für Nahrungsmittelproduktion, Natur-, Boden- sowie Klimaschutz (Kap. 3) kann für jede Gitterzelle im Modell die für den Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung stehende Fläche bestimmt werden. Im Modell wird angenommen, dass jeweils auf der Hälfte dieser Fläche hochproduktive Gräser und schnell wachsende Baumarten angebaut werden. Falls auf der zur Verfügung stehenden Fläche nur einer dieser beiden Pflanzentypen wächst (z.B. gedeihen in vielen Regionen im unbewässerten Anbau nur Gräser), so wird die gesamte Fläche mit diesem Pflanzentyp bepflanzt. Aus Fläche und Ertragspotenzialen beider Pflanzentypen ergibt sich die jährlich produzierbare Menge an primärer Bioenergie, d.h. der in der Biomasse enthaltenen chemischen Energie. Dabei wird ein Energiegehalt der Trockenmasse von 19,0 kJ pro g angenommen (Wirsenius, 2000).

6.3.2
Im Modell verwendete Datensätze

6.3.2.1
Klimawandel und -daten

Monatliche Daten von Temperatur, Niederschlag und Bewölkung sowie jährliche Daten zur atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration werden verwendet, um LPJmL anzutreiben. Die zukünftige Entwicklung des Klimas wurde durch Verwendung verschiedener Klimamodelle berücksichtigt. Allerdings weisen die absoluten Werte der Daten aus den Klimamodellen teilweise signifikante Abweichungen von den gemessenen Werten auf, was die Qualität der Vegetationsmodellierung stark beeinträchtigen kann. Aus diesem Grund wurden für die Szenarienrechnungen mit LPJmL die Anomalien von Temperatur und Niederschlag auf die langjährigen Mittel (1961–1990) der beobachteten Daten der Climatic Research Unit (CRU) (New et al., 2000) aufgeprägt (Schaphoff et al., 2006).

6.3.2.2
Landnutzungsdaten

Neben den klimatologischen Daten in den einzelnen Gitterzellen benötigt das Modell auch Informationen über Bodeneigenschaften, aktuelle Landnutzung sowie die Verteilung von unbewässerten und bewässerten landwirtschaftlichen Flächen (Klein Goldewijk et al., 2007; Portmann et al., 2008; Ramankutty et al., 2008). Stark geneigte Hangflächen werden aufgrund der relativ niedrigen räumlichen Auflösung des Modells nicht explizit ausgeschlossen, die im Modell verwendeten Klimadaten verhindern aber eine unrealistische Biomasseproduktion auf diesen Flächen. Der Ausschluss marginaler Böden erfolgt nach dem Datensatz des Global Assessment of Human Induced Soil Degradation (GLASOD) (Oldeman et al., 1991), wie in Abbildung 6.4-1 dargestellt. Höchst degradierte Flächen (Kategorie 4) können im Modell nicht in Anbauflächen für Energiepflanzen umgewandelt werden. Auf stark degradierten Flächen (Kategorie 3) verringern sich potenzielle

Abbildung 6.4-1
Für den Anbau von Bioenergie ausgeschlossene höchst degradierte Flächen (Kategorie 4, Gesamtfläche 680 Mio. ha) sowie stark degradierte Böden (Kategorie 3, 2.400 Mio. ha), auf denen 30 % Erträge angenommen werden.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008, basierend auf Oldeman et al., 1991

Erträge auf 30 %. Siedlungsflächen werden bei der Modellierung nicht explizit ausgeschlossen; sie tragen allerdings nur mit etwa 2 % zur globalen Landnutzung bei (Lambin et al., 2001) und können daher vernachlässigt werden.

6.4 Modellannahmen und Szenarien

6.4.1 Klimamodelle und Emissionsszenarien

Für die in diesem Gutachten verwendeten Szenarien wurde LPJmL mit Daten verschiedener aktueller Klimamodelle angetrieben, die alle für den 4. Sachstandsbericht des IPCC (IPCC, 2007d) berechnet wurden. Auswahlkriterium für die Klimamodelle war dabei eine möglichst gute Übereinstimmung von simulierten und beobachteten Werten für Temperatur und Niederschlag im Zeitraum von 1961–1990. Ausgewählt wurden ECHAM5 (Roeckner et al., 2003), HadCM3 (Pope et al., 2000), CM2.1 (Delworth et al., 2006), ECHO-G (Legutke und Voss, 1999) und CCSM3.0 (Collins et al., 2006). Alle Klimamodelle wurden mit drei IPCC-Emissionsszenarien (A1B, A2 und B1) angetrieben (IPCC, 2000).

6.4.2 Bewässerungsszenarien

Für die Modellierung des globalen Bioenergiepotenzials wird zwischen unbewässertem und bewässertem Anbau unterschieden, wobei für den letzteren ein Anteil von 10 % bewässerter Anbauflächen angenommen wird. Zum Vergleich: Der Anteil derzeit bewässerter Flächen an den gesamten Agrarflächen (Äcker und Weiden) ist regional sehr unterschiedlich. Die Wert reichen von 0,5 % in Afrika südlich der Sahara über 2,6 % in der ehemaligen Sowjetunion, 4,7 % in Nordamerika, 6,1 % in Europa bis zu 25,8 % in Südostasien und Indien, mit einem globalen Mittelwert von 5,4 % (Portmann et al., 2008). Der bewässerte Anteil der Ackerflächen ist höher; er lag 1998 bei etwa 16,9 %, bis 2030 geht die FAO von einer Steigerung auf etwa 18,0 % aus (Faurès et al., 2000). Da aber in der Modellierung der Anbau von Energiepflanzen nicht auf bereits erschlossenen Ackerflächen erfolgen soll, und die zur Verfügung stehenden Flächen zudem zu einem erheblichen Teil in Entwicklungsländern liegen, hält der WBGU – auch angesichts des in vielen Regionen nicht ausreichen zur Verfügung stehenden Wassers – einen Flächenanteil von maximal 10 % für den bewässerten Anbau für realistisch.

6.4.3 Szenarien zur Berechnung der Biomassepotenziale

Das globale Potenzial für Bioenergie ergibt sich aus den modellierten potenziellen Erträgen sowie der zur Verfügung stehenden Fläche für den Anbau der Biomasse. Dem Leitplanken-Ansatz des WBGU (Kap. 3) folgend wurde einen szenarienbasierter Ansatz für die Analyse der Möglichkeiten einer nachhaltigen Bioenergieproduktion gewählt. Dabei lassen sich drei Hauptfaktoren unterscheiden, die entscheidend sein sollten für Größe und Verteilung von Anbauflächen für Energiepflanzen in den kommenden Jahrzehnten: der Flächenbedarf der Nahrungsmittelproduktion, benötigte Flächen für den Schutz der Biodiversität und von Gebieten unberührter Natur sowie die Treibhausgasbilanz des notwendigen Landnutzungswandels.

6.4.3.1 Szenarien zur Sicherung der Nahrungsmittelproduktion

Problematisch bleibt die Abschätzung von zusätzlichem Flächenbedarf für die landwirtschaftliche Nahrungsmittelproduktion, da dieser maßgeblich von der Bevölkerungsentwicklung, den Ernährungsgewohnheiten sowie vom technologischen Fortschritt der Agrarproduktion abhängt. Die künftige Entwicklung dieser Parameter ist naturgemäß nur unzulänglich bekannt. Der WBGU erachtet es jedoch als unwahrscheinlich, dass bislang für die Nahrungsmittelproduktion genutzte Flächen für den Anbau von Energiepflanzen genutzt werden können (Kap. 5.2).

In den vorliegenden Modellrechnungen unterscheidet der WBGU daher zwei Szenarien für den Flächenbedarf der Nahrungsmittelproduktion:

Szenario A: Dieses Szenario folgt einer Prognose der Food and Agriculture Organization (FAO) der Vereinten Nationen, die bis zum Jahr 2030 die Notwendigkeit einer Ausweitung der für die weltweite Nahrungsmittelproduktion verwendeten Flächen um 120 Mio. ha vorhersagt (FAO, 2003a). In diesem Szenario werden also die bestehenden, für die Nahrungsmittelproduktion verwendeten Flächen sowie zusätzliche 120 Mio. ha der produktivsten Flächen für den Anbau von Energiepflanzen ausgeschlossen.

Szenario B: Das weniger restriktive Szenario B geht davon aus, dass die bestehenden Flächen für die Nahrungsmittelproduktion zur Ernährung der Weltbevölkerung ausreichen und nicht für den Anbau von Energiepflanzen verwendet werden.

Die ausgeschlossenen Flächen für beide Szenarien sind in Abbildung 6.4-2 dargestellt.

6.4.3.2 Szenarien zum Schutz von Biodiversität und Wildnisgebieten

Der Ausschluss von Gebieten mit hohem ökologischem Wert folgt verschiedenen Szenarien zur Berücksichtigung von Gebieten hoher Biodiversität bzw. von Wildnisgebieten. Grundsätzlich ausgeschlossen von jeglicher Nutzung sind zunächst einmal bestehende Schutzgebiete laut World Database on Protected Areas (WDPA, 2008), wie sie in Abbildung 6.4-3 dargestellt sind.

Zum zusätzlichen Ausschluss von Gebieten hoher Biodiversität, die bislang nicht unter Schutz stehen, werden vier verschiedene Indikatoren für schützenswerte Biodiversität verwendet:

- *Biodiversity Hotspots* (Mittermeier et al., 2004) sind Gebiete, in denen eine außergewöhnlich hohe Konzentration endemischer Arten überdurchschnittlich hohe Lebensraumverluste erleidet,
- *Endemic Bird Areas* (Stattersfield et al., 1998) zeichnen sich durch eine große Konzentration von Vogelarten mit geringer geographischer Verbreitung aus,
- *Centers of Plant Diversity* (WWF und IUCN, 1994) weisen entweder eine hohe Diversität von Pflanzenarten oder eine große Zahl endemischer Arten auf (oder beides),
- *Global 2000* (Olson et al., 2001) schließlich ist eine Liste von mehr als 200 Land-, Süßwasser- oder Meeres-Ökosystemen, die sich durch eine außergewöhnlich hohe Biodiversität auszeichnen und repräsentativ für ihre jeweiligen Ökosysteme sind.

Eine weitere Kategorie schützenswerter Flächen stellen so genannte Wildnisgebiete dar. Hierbei handelt es sich um große Flächen (z. B. tropische Regenwälder, boreale Wälder, Grasland, Halbwüsten usw.), die durch ihre Entfernung von der Zivilisation oder andere Gründe noch im naturbelassenen Zustand sind. Sie beinhalten nicht immer hohe Konzentrationen biologischer Vielfalt, erbringen aber häufig sehr wertvolle Ökosystemleistungen. Für diese Gebiete unberührter Wildnis werden folgende drei Datensätze herangezogen: High-Biodiversity Wilderness Areas (Mittermeier et al., 2003), Frontier Forests (Bryant et al., 1997), Last of the Wild (Sanderson et al., 2002).

Um diese Datensätze für schützenswerte Biodiversitäts- und Wildnisgebiete miteinander zu verschneiden und damit zu tatsächlichen Ausschlussflächen zu gelangen, werden die Flächen nach der Zahl der Indikatordatensätze kategorisiert, in denen sie auftauchen: Je größer die Übereinstimmung der verschiedenen Indikatoren, desto höher der Anteil der

Abbildung 6.4-2
(a) Anteil der aktuellen landwirtschaftlichen Flächen in den Gitterzellen des Modells. Diese Flächen werden in Szenario B von der Bioenergieerzeugung ausgeschlossen. (b) Zusätzlich in Szenario A ausgeschlossene Flächen, um eine Ausweitung der landwirtschaftlichen Flächen für die Ernährung zu ermöglichen. Diese sind produktivsten 120 Mio. ha der Flächen, die in Szenario B für den Bioenergieanbau zur Verfügung stehen.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Fläche, die unter Schutz gestellt wird. Auch hier werden zwei Szenarien unterschieden:

Szenario A: In diesem Szenario werden Wildnisgebiete immer zu 100 % unter Schutz gestellt, auch wenn nur einer der Wildnisindikatoren erfüllt ist. Für den Schutz der Schwerpunkte biologischer Vielfalt wird ein abgestuftes System verwendet, dass generell 10 % aller Flächen unter Schutz stellt, bei Auftreten

Naturschutzgebiete

Abbildung 6.4-3
Räumliche Verteilung der aktuell unter Naturschutz stehenden Gebiete mit einer Gesamtfläche von 1.330 Mio. ha. Diese Gebiete werden im Modell für den Anbau von Energiepflanzen ausgeschlossen.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008, basierend auf WDPA, 2008

eines Indikators 20 % und bei Übereinstimmung von zwei, drei oder vier Indikatoren jeweils 30 %, 50 % bzw. 80 % der Fläche unter Schutz stellt.

Szenario B: Im weniger restriktiven B-Szenario werden Wildnisgebiete nur dann zu 100 % unter Schutz gestellt, wenn mindestens zwei der Indikatoren übereinstimmen, Biodiversitätsgebiete werden nur bei Übereinstimmung von drei oder vier Indikatoren zu 50 % bzw. 80 % geschützt.

Die Indikatoren für die Szenarien sind in Tabelle 6.4-1 zusammengefasst, und die resultierenden Ausschlussgebiete in Abbildung 6.4-4 dargestellt.

6.4.3.3 Szenarien zu Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderungen

Insbesondere die Freisetzung von CO_2 aus Vegetation und Böden durch Rodung von Wäldern oder dem Trockenlegen von Feuchtgebieten führt zu wesentlich größeren Treibhausgasemissionen als durch die Substitution fossiler Energieträger bei der nachfolgenden Biomassenutzung eingespart werden kann (Kap. 4.2.3.1 und 4.2.3.2). Solche Standorte sind zum größten Teil bereits in den Flächen hoher Biodiversität und geringer menschlicher Einflussnahme enthalten (Naturwälder, Feuchtgebiete) und werden deshalb ohnehin nicht für den Energiepflanzenanbau berücksichtigt.

Zusätzlich werden auch Feuchtgebiete aus der Global Lakes and Wetlands Database (Lehner und Doll, 2004) von menschlicher Nutzung ausgenom-

Tabelle 6.4-1
Anteil geschützter Flächen zum Schutz von Wildnisgebieten und Biodiversität für die beiden Szenarien.
Quelle: WBGU

	Übereinstimmungen							
Szenario	Wildnisgebiete			Biodiversitätsschwerpunkte				
	1	2	3	0	1	2	3	4
A	100 %	100 %	100 %	10 %	20 %	30 %	50 %	80 %
B	0 %	100 %	100 %	0 %	0 %	0 %	50 %	100 %

Abbildung 6.4-4
Für den Anbau von Bioenergiepflanzen ausgeschlossene Gebiete zum Schutz der Biodiversität und von unberührter Wildnis für die beiden im Text beschriebenen Szenarien. (a) Szenario A: hoher Biodiversitätsschutz. (b) Szenario B: geringer Biodiversitätsschutz (Tab. 6.4-1).
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Abbildung 6.4-5
Von der Biomassenutzung ausgeschlossene Feuchtgebiete mit einer Gesamtfläche von 1.150 Mio. ha.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008, basierend auf Lehner und Doll, 2004

men, die im Modell eine starke Kohlenstoffsenke darstellen und bei der Reservierung von Naturschutzflächen noch nicht berücksichtigt wurden (s. Abb. 6.4-5).

Schließlich muss im Sinne der Klimaschutzleitplanke der Anbau von Energiepflanzen auf Landflächen ausgeschlossen werden, bei denen die Treibhausgasemissionen aus der Umwandlung der Fläche erst nach sehr langer Zeit durch den aus der Atmosphäre aufgenommenen Kohlenstoff kompensiert werden. Idealerweise müssten bei dieser Rechnung auch die durch den landwirtschaftlichen Anbau und die Verarbeitung von Energiepflanzen (Agrarmaschinen, Dünger) verursachten Emissionen sowie die bei der energetischen Nutzung der Biomasse eingesparten Emissionen fossiler Energieträger berücksichtigt werden. Da diese Daten im Rahmen des Modells nicht zur Verfügung stehen, beschränkt sich der WBGU hier auf die Kompensation der Emissionen aus der Landnutzungsänderung durch den anschließend durch den Boden sowie durch die aufwachsende Biomasse aus der Atmosphäre aufgenommenen Kohlenstoff. Dies kann als Indikator dafür herangezogen werden, welche minimale Kompensationszeit in der Gesamtbilanz erreicht werden kann:

Für die Treibhausgasbilanz ist zu berücksichtigen, dass der durch den Boden aufgenommene Kohlenstoff im Idealfall dort verbleibt, während der in der in der aufwachsenden Biomasse gespeicherte Kohlenstoff nach dem Ernten wieder freigesetzt wird, dafür aber fossile CO_2-Emissionen ersetzt. Es ist daher zu klären, inwieweit der in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff ein guter Indikator für die Menge an fossilen CO_2-Emissionen ist, die bei der Substitution fossiler Energieträger durch die energetische Nutzung dieser Biomasse vermieden werden.

Betrachtet man den in verschiedenen Energieträgern enthaltenen Kohlenstoff pro gespeicherte Energieeinheit (Kaltschmitt und Hartmann, 2003), so entsprechen die potenziellen CO_2-Emissionen bei der Energienutzung von Biomasse etwa derjenigen von Steinkohle und liegen ca. 20 % unter denen von Braunkohle. Wenn direkt Braunkohle ersetzt wird, kann man also theoretisch mit der Biomassenutzung knapp 20 % mehr fossiles CO_2 einsparen als in der Biomasse gespeichert ist, beim Ersatz von Steinkohle etwa so viel, wie gespeichert ist. Andere fossile Energieträger (Öl, Gas) haben geringere Kohlenstoff-Gehalte, dort kann also entsprechend weniger eingespart werden. Dabei werden Umwandlungsverluste bei der technischen Konversion nicht berücksichtigt.

Daraus lässt sich erkennen, dass der in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff ein guter Richtwert dafür ist, wie viel CO_2-Emissionen maximal eingespart werden können, denn zusätzlich zu den Emissionen aus den Landnutzungsänderung fallen ja noch die Emissionen aus dem Anbau und mögliche Umwandlungsverluste an.

Offensichtlich können also durch die Substitution von fossilen Energieträgern durch Biomasse in der

Abbildung 6.4-6
Dargestellt sind Regionen, in denen der Anbau von Biomasse den Verlust von Kohlenstoff durch die Landnutzungsänderung nicht innerhalb von (a) fünf Jahren (Szenario A: Gesamtfläche 3.713 Mio. ha) bzw. (b) 10 Jahren (Szenario B: Gesamtfläche 2.891 Mio. ha) ausgleichen kann.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Regel insgesamt weniger Treibhausgas-Emissionen eingespart werden als dem in der Biomasse gespeicherten Kohlenstoff entspricht. Der WBGU hält nur Nutzungspfade von Biomasse für sinnvoll, bei denen die Kompensationszeit (d.h. der Zeitraum nach einer Landnutzungskonversion, ab dem eine reale Emissionsminderung beginnt) relativ kurz ist (etwa zehn Jahre). Damit dies erreicht werden kann, muss der

Abbildung 6.4-7
Globale Verbreitung von Waldgebieten.
Quelle: FAO, 2006c

freigesetzte Kohlenstoff also nach maximal zehn Jahren durch den Boden und die aufwachsende Biomasse wieder aufgenommen werden. Daher verwendet der WBGU zwei Szenarien, die sich durch den Kompensationszeitraum unterscheiden:

Szenario A: In diesem Szenario wird ein maximaler Kompensationszeitraum von fünf Jahren für die Emissionen aus der Landnutzungsänderung festgesetzt.

Szenario B: Im weniger restriktiven B-Szenario beträgt der maximale Kompensationszeitraum zehn Jahre.

Die räumliche Verteilung dieser Ausschlussgebiete ist in Abbildung 6.4-6 dargestellt. Ein Vergleich mit der geographischen Verteilung von Waldgebieten (FAO, 2006c) zeigt, dass es sich bei den ausgeschlossenen Gebieten größtenteils um Wälder handelt (Abb. 6.4-7). Damit sind diese Gebiete zwar von der Umnutzung in Flächen zum Anbau von Energiepflanzen ausgeschlossen, können aber z.T. gegebenenfalls Beiträge zum Bioenergiepotenzial aus Waldreststoffen und Forstzuwächsen leisten (Kap. 5.5 und 6.8).

6.5 Ergebnisse

6.5.1 Einfluss der Klimamodelle und Emissionsszenarien

Der Einfluss der verschiedenen Klimamodelle sowie der beiden Emissionsszenarien auf die modellierten Bioenergiepotenziale ist im Vergleich zur Bedeutung der Ausschlusskriterien für das verfügbare Land nur sehr gering. So beträgt beispielsweise das Potenzial im HadCM3-Modell für unbewässerten Anbau, das A1B-Szenario sowie ein bestimmtes Landnutzungsszenario 34,5 EJ pro Jahr und für ECHAM5 34,1 EJ pro Jahr. Die entsprechenden Werte für die Szenarien A2 und B1 betragen für HadCM3 34 bzw. 33 EJ pro Jahr. Die Unterschiede liegen also deutlich unter 10 %.

Der Grund hierfür dürfte darin liegen, dass sich die prognostizierten Änderungen der klimatischen Standortbedingungen in den Regionen mit potenziellen Anbauflächen für Energiepflanzen nur wenig unterscheiden. Als Beispiel sei das Amazonasgebiet genannt, wo sich die Vorhersagen verschiedene Klimamodelle deutlich unterscheiden, dessen Fläche aber für die vorliegende Modellierung aus Natur-

Tabelle 6.5-1
Definition der vier vom WBGU verwendeten Landnutzungsszenarien.
Quelle: WBGU

Szenario	Beschreibung	Ernährung	Natur-/Biodiversitätsschutz
1	Hoher Agrarflächenbedarf / hoher Biodiversitätsschutz	A	A
2	Hoher Agrarflächenbedarf / geringer Biodiversitätsschutz	A	B
3	Geringer Agrarflächenbedarf / hoher Biodiversitätsschutz	B	A
4	Geringer Agrarflächenbedarf / geringer Biodiversitätsschutz	B	B

Tabelle 6.5-2
Potenzielle Anbauflächen sowie Bioenergiepotenziale für die Jahre 2000 sowie 2050 und die vier Landnutzungsszenarien.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Szenario		Anbaufläche [Mha]	Bioenergiepotenzial im Jahr 2000 [EJ pro Jahr]		Bioenergiepotenzial im Jahr 2050 [EJ pro Jahr]	
			Unbewässert	Bewässert	Unbewässert	Bewässert
1	Hoher Agrarflächenbedarf / hoher Biodiversitätsschutz	240	35	42	34	42
2	Hoher Agrarflächenbedarf / geringer Biodiversitätsschutz	380	63	74	61	71
3	Geringer Agrarflächenbedarf / hoher Biodiversitätsschutz	360	75	83	74	83
4	Geringer Agrarflächenbedarf / geringer Biodiversitätsschutz	500	110	120	100	120

und Klimaschutzgründen von der Biomassenutzung ausgenommen wurde.

Die Ergebnisse der Modellierung sind also weitgehend unabhängig vom verwendeten Klimamodell und Emissionsszenario. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich daher nur auf Berechnungen mit dem HadCM3-Modell unter Verwendung des A1B-Szenarios.

6.5.2 Einfluss des Kompensationszeitraumes

Es zeigt sich, dass die Wahl des Kompensationszeitraumes von fünf bzw. zehn Jahren für die Aufnahme des bei der Landnutzungsänderung zur Biomasseanbaufläche freigesetzten Kohlenstoffs nur einen geringen Einfluss auf die simulierten Bioenergiepotenziale hat. Die maximale Variation beträgt 10 %. Im Folgenden werden daher nur Ergebnisse für einen Kompensationszeitraum von zehn Jahren gezeigt.

6.5.3 Bioenergiepotenziale für vier Szenarien

Da die verschiedenen Klimamodelle und Emissionsszenarien sowie die beiden betrachteten Kompensationszeiträume nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Berechnung des globalen nachhaltigen Bioenergiepotenzials im Jahr 2050 haben, beschränkt sich die folgende Darstellung auf die Abhängigkeit des Potenzials von den beiden verbleibenden Einflussfaktoren, den Szenarien für die Nahrungsmittelproduktion und den Naturschutz.

Im Folgenden betrachten wir daher vier Szenarien, die sich aus der Kombination der beiden Szenarien für den Flächenbedarf zur Sicherung der Ernährung (Kap. 6.4.2.1) sowie zur Bewahrung von Biodi-

Abbildung 6.5-1
Räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen für Szenario 1 (hoher Agrarflächenbedarf, hoher Biodiversitätsschutz). Die Bioenergiepotenziale sind jeweils für das Jahr 2050 für (a) unbewässerten Anbau (insgesamt 34 EJ pro Jahr) und (b) bewässerten Anbau (insgesamt 42 EJ pro Jahr) ausgewiesen.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Abbildung 6.5-2
Räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen für Szenario 2 (hoher Agrarflächenbedarf, geringer Biodiversitätsschutz). Die Bioenergiepotenziale sind jeweils für das Jahr 2050 für (a) unbewässerten Anbau (insgesamt 61 EJ pro Jahr) und (b) bewässerten Anbau (insgesamt 71 EJ pro Jahr) ausgewiesen.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Abbildung 6.5-3
Räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen für Szenario 3 (geringer Agrarflächenbedarf, hoher Biodiversitätsschutz). Die Bioenergiepotenziale sind jeweils für das Jahr 2050 für (a) unbewässerten Anbau (insgesamt 74 EJ pro Jahr) und (b) bewässerten Anbau (insgesamt 83 EJ pro Jahr) ausgewiesen.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Abbildung 6.5-4
Räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen für Szenario 4 (geringer Agrarflächenbedarf, geringer Biodiversitätsschutz). Die Bioenergiepotenziale sind jeweils für das Jahr 2050 für (a) unbewässerten Anbau (insgesamt 100 EJ pro Jahr) und (b) bewässerten Anbau (insgesamt 120 EJ pro Jahr) ausgewiesen.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Tabelle 6.5-3
Bioenergiepotenziale für das Jahr 2000 in einzelnen Weltregionen für vier Landnutzungsszenarien.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Bioenergiepotenziale unbewässert [EJ pro Jahr]										
Region	AFR	CPA	EUR	GUS	LAM	MEA	NAM	PAO	PAS	SAS
1	6,0	3,6	3,4	1,3	10	0,8	5,2	1,6	0,6	2,5
2	8,3	8,4	5,3	2,2	19	1,3	9,7	4,9	1,0	3,0
3	7,9	10	11	7,0	15	0,9	11	3,0	6,6	2,6
4	11	13	13	7,4	27	1,4	13,4	6,5	10	3,1
Bioenergiepotenziale bewässert [EJ pro Jahr]										
Region	AFR	CPA	EUR	GUS	LAM	MEA	NAM	PAO	PAS	SAS
1	8,4	3,8	3,7	1,4	12	1,0	5,5	2,3	0,7	3,6
2	11	8,7	5,9	2,3	21	1,6	10	7,4	1,0	4,2
3	10	11	12	7,2	17	1,0	11	3,8	6,7	3,7
4	14	14	14	7,7	30	1,7	14	9,1	10	4,3

versität und Wildnisgebieten (Kap. 6.4.2.2) ergeben. Dabei wird die in Tabelle 6.5-1 angegebene Nomenklatur verwendet.

Für diese vier Szenarien ergeben sich folgende Ergebnisse für das globale Bioenergiepotenzial aus dem Anbau von Energiepflanzen in 2050 (Tab. 6.5-2): Die unter Berücksichtigung aller Leitplanken für den Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung stehenden Flächen betragen je nach Szenario zwischen 240 und 500 Mha. Auf diesen Flächen lassen sich im Jahr 2050 in unbewässertem Anbau Erträge mit einem Energiepotenzial von 34–100 EJ pro Jahr, in bewässertem Anbau von 42–120 EJ pro Jahr erzielen. Dabei entfallen jeweils etwa 75 % der modellierten Bioenergiepotenziale auf Gräser und 25 % auf Bäume. Die Vergleichswerte für die Potenziale im Jahr 2000 unterscheiden sich global kaum von den Potenzialen für 2050, es ergibt sich allerdings eine andere regionale Verteilung (Kap. 6.5-4).

6.5.4 Räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen für Energiepflanzen

Die geographische Verteilung potenzieller Anbauflächen für Energiepflanzen im Jahr 2050 ist in den Abbildungen 6.5-1 bis 6.5-4 gezeigt. Deutlich wird der große Einfluss der expandierenden landwirtschaftlichen Flächen für die Nahrungsmittelproduktion in den Szenarien 1 und 2. Dies führt dazu, dass die produktiven Regionen in den mittleren Breiten

Tabelle 6.5-4
Bioenergiepotenziale für das Jahr 2050 in einzelnen Weltregionen für vier Landnutzungsszenarien.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Bioenergiepotenziale unbewässert [EJ pro Jahr]										
Region	AFR	CPA	EUR	GUS	LAM	MEA	NAM	PAO	PAS	SAS
1	5,1	4,1	4,9	2,4	8,0	0,5	5,0	1,8	0,7	2,0
2	6,9	9,9	7,4	3,6	14	0,8	10	4,4	1,0	2,6
3	8,2	10	12	8,1	13	0,5	11	2,4	6,8	2,2
4	11	14	14	8,9	23	0,8	14	5,1	10	2,8
Bioenergiepotenziale bewässert [EJ pro Jahr]										
Region	AFR	CPA	EUR	GUS	LAM	MEA	NAM	PAO	PAS	SAS
1	7,6	4,3	5,4	2,6	9,5	0,7	5,3	2,3	0,8	3,2
2	10	10,3	8,1	3,8	16	1,0	11	6,3	1,0	3,8
3	11	11	13	8,5	14	0,7	12	3,0	7,0	3,4
4	14	15	15	9,4	25	1,0	15	7,1	11	4,0

Abbildung 6.5-5
Die zehn Weltregionen, die in diesem Kapitel verwendet werden.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Osteuropas und Nordamerikas nicht für den Anbau von Biomasse zur Verfügung stehen. Die Produktion des Rohstoffs Biomasse in größeren, zusammenhängenden Flächen bleibt dadurch beschränkt auf den Übergangsbereich von Sahelzone und Savannen in Afrika, Flächen im südlichen Afrika, den indischen Subkontinent und Teile des nördlichen Australiens. Die Fläche für die dargestellten Anbaugebiete entspricht dabei 20 bis 30 % der heutigen Anbauflächen für Feldfrüchte.

Die Bioenergiepotenziale für zehn Weltregionen sind in Tabelle 6.5-3 aufgeschlüsselt. Hierbei werden folgende Regionen verwendet: Afrika südlich der Sahara (AFR), China und angrenzende Länder (CPA), Europa (EUR), die Gemeinschaft unabhängiger Staaten (Staaten der ehemaligen Sowjetunion, GUS), Lateinamerika und Karibik (LAM), Naher Osten und Nordafrika (MEA), Nordamerika (NAM), die pazifischen OECD-Staaten (mit Japan, Australien und Neuseeland, PAO), das pazifische Asien (Südostasien, PAS) sowie Südasien (mit Indien, Pakistan und Bangladesch, SAS). Diese Regionen sind auch in Abbildung 6.5-5 gezeigt.

6.5.5 Biomasseerträge für Bäume und Gräser

Potenzielle Biomasseerträge für die im Modell simulierten hochproduktiven Gräser und schnell wachsenden Bäume in Kurzumtriebplantagen, jeweils für unbewässerten und bewässerten Anbau sowie für die beiden Szenarien mit der geringsten bzw. größten Ausschlussfläche, sind in den Abbildungen 6.5-6 bis 6.5-9 gezeigt. Die modellierten Erträge der Gräser und Bäume bilden die Grundlage für die in den Abbildungen 6.5-1 bis 6.5-4 gezeigten Biomassepotenziale. Auf den nach Berücksichtigung der Ausschlussflächen zur Verfügung stehenden Anbauflächen für Energiepflanzen werden im Modell zu je 50% hochproduktive Gräser und schnell wachsende Baumarten angebaut. Falls in einer Gitterzelle nur ein Pflanzentyp gedeiht (z.B. nur Gräser im unbewässerten Anbau), so wird die gesamte Fläche diesem Pflanzentyp zugewiesen. Die resultierenden Trockenmasseerträge werden dann in Energieeinheiten umgerechnet, wobei ein Konversionsfaktor von 19,0 kJ pro g angenommen wird (Kap. 6.3.1.5). Aus dem Vergleich der gezeigten Karten für ein Szenario kann

Abbildung 6.5-6
Simulierte Biomasseerträge im Jahr 2050 für Gräser (a) im unbewässerten und (b) bewässerten Anbau. Ausschlussflächen basieren auf Szenario 1. Auf den verbleibenden Flächen wird zur Berechnung des Bioenergiepotenzials ein Anbau von hochproduktiven Gräsern und schnell wachsenden Baumarten auf jeweils der Hälfte der Fläche angenommen. Aus dem Vergleich mit Abbildung 6.5-7 kann der relative Beitrag von Biomasse aus dem Anbau von hochproduktiven Gräsern und schnell wachsenden Baumarten zum Bioenergiepotenzial abgeschätzt werden.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Abbildung 6.5-7
Simulierte Biomasseerträge im Jahr 2050 für Bäume im (a) unbewässerten und (b) bewässerten Anbau. Ausschlussflächen basieren auf Szenario 1. Auf den verbleibenden Flächen wird zur Berechnung des Bioenergiepotenzials ein Anbau von hochproduktiven Gräsern und schnell wachsenden Baumarten auf jeweils der Hälfte der Fläche angenommen. Aus dem Vergleich mit Abbildung 6.5-6 kann der relative Beitrag von Biomasse aus dem Anbau von hochproduktiven Gräsern und schnell wachsenden Baumarten zum Bioenergiepotenzial abgeschätzt werden.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Abbildung 6.5-8
Simulierte Biomasseerträge im Jahr 2050 für Gräser im (a) unbewässerten und (b) bewässerten Anbau. Ausschlussflächen basieren auf Szenario 4. Auf den verbleibenden Flächen wird zur Berechnung des Bioenergiepotenzials ein Anbau von hochproduktiven Gräsern und schnell wachsenden Baumarten auf jeweils der Hälfte der Fläche angenommen. Aus dem Vergleich mit Abbildung 6.5-9 kann der relative Beitrag von Biomasse aus dem Anbau von hochproduktiven Gräsern und schnell wachsenden Baumarten zum Bioenergiepotenzial abgeschätzt werden.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Abbildung 6.5-9
Simulierte Biomasseerträge im Jahr 2050 für Bäume im (a) unbewässerten und (b) bewässerten Anbau. Ausschlussflächen basieren auf Szenario 4. Auf den verbleibenden Flächen wird zur Berechnung des Bioenergiepotenzials ein Anbau von hochproduktiven Gräsern und schnell wachsenden Baumarten auf jeweils der Hälfte der Fläche angenommen. Aus dem Vergleich mit Abbildung 6.5-8 kann der relative Beitrag von Biomasse aus dem Anbau von hochproduktiven Gräsern und schnell wachsenden Baumarten zum Bioenergiepotenzial abgeschätzt werden.
Quelle: Beringer und Lucht, 2008

Abbildung 6.6-1
Geographische Verteilung der Nutztierdichte weltweit. Es sind Schweine, Geflügel, Vieh und kleine Wiederkäuer erfasst. Die Nutztierdichte ist in Großvieheinheiten (GV) pro km³ angegeben. Kleinere Tiere werden dabei entsprechend ihres Nahrungsbedarfs geringer gewichtet; so entspricht ein Schaf oder eine Ziege beispielsweise (zum Teil regional unterschiedlich) 0,10–0,15 GV, ein Schwein entspricht 0,20–0,25 GV.
Quellen: FAO, 2003b; Steinfeld et al., 2006

der relative Beitrag von Biomasse aus dem Anbau von hochproduktiven Gräsern und schnell wachsenden Baumarten zum Bioenergiepotenzial abgeschätzt werden.

6.6 Wichtigste Unsicherheiten der Modellierung

6.6.1 Qualität der Klimadaten

Die verschiedenen Klimamodelle unterscheiden sich besonders hinsichtlich der simulierten Änderungen der Niederschläge, da die entsprechenden Prozesse teilweise nicht vollständig verstanden oder schwierig zu simulieren sind. Gerade die Menge an Wasser, die für die Pflanzen verfügbar ist, ist aber die wichtigste Determinante für die simulierten Ertragspotenziale der Biomassepflanzungen. Der geringe Einfluss der unterschiedlichen Klimadaten auf die Biomasseerträge aus LPJmL weist allerdings darauf hin, dass der Effekt von veränderten Temperatur- und Niederschlagsbedingungen in den für Biomassepflanzungen geeigneten Gebieten eher gering ist.

6.6.2 Reaktion von Pflanzen und Ökosystemen auf den Klimawandel

Die Effekte von veränderten Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen, sowie der zunehmenden Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre auf die einzelne Pflanze oder ganze Ökosysteme sind immer noch nicht umfassend verstanden. Ein Beispiel ist die so genannte CO_2-Düngung, die zu einer erhöhten Wassernutzungseffizienz bei C3-Pflanzen führt. In trockenen Gebieten wirkt die CO_2-Düngung am stärksten und führt im Modell zu einer Produktivitätszunahme von etwa 10–20 %.

Dieser Effekt ist im Modell hauptverantwortlich für die Zunahme der pflanzlichen Produktivität im Verlauf des 21. Jahrhundert. Die simulierten Effekte der erhöhten CO_2-Konzentration stimmen mit Beobachtungen (z.B. junger Wälder) überein. Allerdings ist unklar, ob der Anstieg der Nettoprimärproduktion auch dauerhaft ist.

6.6.3
Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen

Die regionale Hydrologie wird – mit Ausnahme der Niederschläge – im Modell nicht berücksichtigt. Damit können eventuell bestehende Nutzungskonkurrenzen um knappe Süßwasserressourcen (Kap. 5.6.2) bei der Betrachtung der Bioenergiepotenziale aus dem Anbau von Energiepflanzen nicht berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere für den Fall des bewässerten Anbaus problematisch, bei dem nicht klar ist, ob die für die Bewässerung angenommene Wassermenge überhaupt zur Verfügung steht.

Ein ähnliches Problem ergibt sich bei Nährstoffen, die für das Pflanzenwachstum unerlässlich sind. Im Hinblick auf ihre negative Klimawirkung sind hier vor allem Treibhausgasemissionen durch die Düngung mit Stickstoff zur berücksichtigen.

Das Ausbringen von organischen und mineralischen Stickstoff-Düngern auf landwirtschaftliche Flächen führt zu erheblichen Stickstoff-Verlusten, denn die Pflanzen nehmen im Mittel weniger als die Hälfte des ausgebrachten Stickstoffs (N) auf (MA, 2005b). Der Rest entweicht als flüchtige Stickstoff-Verbindungen in die Luft (Lachgas N_2O, Stickoxide NOx, Ammoniak NH_3) oder wird als Nitrat (NO_3^-) ins Grundwasser ausgewaschen. Lachgas gehört zu den vier größten klimawirksamen Treibhausgasen (Denman et al., 2007). Fast 60 % der anthropogenen N_2O-Emissionen werden durch die Landwirtschaft verursacht (Smith et al., 2007a).

Der Stickstoffverbrauch in der Landwirtschaft beträgt heute weltweit 127 Mio. t und wird bis 2011/2012 jährlich um geschätzte 1,4 % ansteigen (FAO, 2008b). Die durch die Landwirtschaft verursachten Stickstoff-Verluste sind bei der Modellierung von Agrarproduktions-Potenzialen nicht vernachlässigbar.

Um Stickstoff-Verluste zu vermeiden, müssen der Stickstoff-Gehalt im Boden und der Nährstoffbedarf der Ackerfrucht genau bekannt sein und bei künstlicher Bewässerung sollte ein kontrolliertes Bewässerungsregime eingesetzt werden, um die Auswaschung von Nitraten zu vermeiden (Fang et al., 2006).

6.6.4
Entwicklung der Erträge von Energiepflanzen

Die Simulation der Biomasseanbauflächen berücksichtigt keine zeitliche Erhöhung des Ertragsniveaus aufgrund der Möglichkeiten von Züchtung oder genetischer Modifikation. Es ist durchaus vorstellbar, dass in Folge zunehmender Forschungsarbeiten die Ertragspotenziale von Energiepflanzen deutlich ansteigen. Allerdings liegen die simulierten Erträge bereits auf dem Niveau heute existierender und optimal bewirtschafteter Versuchsstandorte. Teilweise entsprechen sie aber auch schon den für 2025 erwarteten Potenzialen (z.B. für den Anbau von Rutenhirse (*switchgrass*) in Nordamerika).

6.6.5
Landnutzungsdaten

Einen großen Einfluss auf die modellierten Energiepotenziale hat die Verfügbarkeit von Flächen aufgrund der derzeitigen Landnutzung. Gerade hier weisen allerdings die zugrunde liegenden Datensätze hohe Unsicherheiten auf (Kap. 4.2.2). Daten zu ungenutzten Landflächen in Entwicklungs- und Schwellenländern basieren in der Regel auf Satellitendurchmusterungen. Untersuchungen vor Ort zeigen häufig, dass die lokale Bevölkerung auf diesen scheinbar ungenutzte Flächen Vieh weiden lässt oder Brennholz sammelt. Diese Flächen sind daher für die Sicherung des Lebensunterhaltes der Bevölkerung notwendig und können nicht vollständig für den Anbau von Energiepflanzen genutzt werden. Einen Anhaltspunkt für die Flächennutzung für Beweidung gibt die globale Verteilung der Nutztierdichte, die in Abbildung 6.6-1 gezeigt ist.

Ein Beispiel ist das hohe Potenzial für die Produktion von Biomasse in Indien. Es ist sehr wahrscheinlich, dass dort besonders die Informationen über die Verteilung von landwirtschaftlich genutzten Flächen fehlerhaft sind, und somit der Anteil ungenutzter Flächen überschätzt wird. Das tatsächliche Potenzial liegt in diesen Regionen somit wahrscheinlich niedriger, als von den Simulationen angezeigt.

Ähnlich problematisch ist die Datenlage zu marginalen Böden (Kasten 4.2-1). Hier ergibt sich darüber hinaus noch die Schwierigkeit, potenzielle Erträge von Energiepflanzen auf stark degradierten Böden abzuschätzen.

6.6.6
Zukünftige Möglichkeiten der Bewässerung

Der Ertrag bewässerter Biomasseanbauflächen liegt deutlich über dem von unbewässerten Anbausystemen. Die angegebenen Energiepotenziale für den bewässerten Anbau beruhen auf der Annahme, dass alle Biomasseanbauflächen zu 10 % bewässert werden, während heute im globalen Durchschnitt nur etwa 5 % der Flächen bewässert werden (Portmann et al., 2008). Dabei erfolgt die Regulierung des Bodenwassergehaltes im Modell hoch effizient, wie es etwa mit der Tröpfchenbewässerung möglich ist. Die präsentierten Ergebnisse setzen also voraus, dass fort-

Kasten 6.7-1

Soziökonomische und politische Indikatoren

Failed State Index
Der Failed State Index (FSI) wird seit 2005 durch den Fund for Peace, eine unabhängige Forschungseinrichtung mit Sitz in Washington D.C., und die Fachzeitschrift Foreign Policy ermittelt, um die empirischen Phänomene von Staatszerfall und Staatsversagen zu erfassen und so „ein Profil der Weltunordnung des 21. Jahrhunderts" zu gewinnen (Debiel und Werthes, 2006; WBGU, 2007). Der Failed State Index setzt sich aus insgesamt zwölf sozialen, ökonomischen und politischen Indikatoren zusammen, die jeweils mit 0–10 Punkten bewertet werden (Mounting Demographic Pressures; Massive Movement of Refugees or Internally Displaced Persons creating Complex Humanitarian Emergencies; Legacy of Vengeance-Seeking Group Grievance or Group Paranoia, Chronic and Sustained Human Flight; Uneven Economic Development along Group Lines; Sharp and/or Severe Economic Decline; Criminalization and/or Delegitimization of the State; Progressive Deterioration of Public Services; Suspension or Arbitrary Application of the Rule of Law and Widespread Violation of Human Rights; Security Apparatus Operates as a "State Within a State"; Rise of Factionalized Elites; Intervention of Other States or External Political Actors). Im theoretischen Falle eines völligen Staatsversagens entlang aller Indikatoren würde somit ein maximaler FSI-Wert von 120 erreicht. Im Failed States Index 2008 sind 177 Staaten erfasst. Foreign Policy kategorisiert die vierzig Staaten mit den höchsten FSI-Werten als „critical" bzw. „in danger". Im aktuellen Ranking erzielt Somalia mit 114,2 Punkten den schlechtesten Wert, im Grenzbereich zwischen akut gefährdeten und „grenzwertigen" Staaten liegen demnach gegenwärtig Ägypten und Laos (jeweils 88,7) sowie Äquatorialguinea und Ruanda (jeweils 88,0; Foreign Policy, 2008).

Der WBGU orientiert sich in seiner Bewertung der Staaten an diesen qualitativen Kategorien und betrachtet die Möglichkeit, theoretisch gegebene Bioenergiepotenziale zu realisieren, in Staaten mit einem FSI-Wert von 90 und mehr als stark eingeschränkt (Abb. 6.7-1).

Global Competitiveness Index
Die jährlich erscheinenden Global Competitiveness Reports des World Economic Forum, enthalten seit 2006 eine Rangliste zur wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit der Nationen, die auf Grundlage des Global Competitiveness Index (GCI) erstellt wird (López-Claros et al., 2006; Porter et al., 2007). Dieser Index bewertet das Investitionsklima und die Wettbewerbsfähigkeit einzelner Volkswirtschaften, wobei die Steigerung der Produktivität als zentraler Faktor für nachhaltiges Wirtschaftswachstum angesehen wird. In den Index, dessen Wert zwischen minimal 1 und maximal 7 liegen kann, fließen aggregierte Daten zu neun relevanten Themenbereichen ein: Institutions, Infrastructure, Macroeconomy, Health and Primary Education, Higher Education and Training, Market Efficiency, Technological Readiness, Business Sophistication und Innovation. Die 131 erfassten Länder werden ihrem GCI-Wert entsprechend aufgelistet, und zusätzlich wird angegeben, ob der Trend im Vergleich zum Vorjahr auf-, absteigend oder gleich bleibend ist. Auf Grund seines komplexen Indikatoren- und Bewertungssystems, das sowohl qualitative als auch quantitative Datensätze berücksichtigt, gilt der GCI gegenwärtig im Vergleich zu anderen Business-Indizes als besonders aussagekräftig (von Drachenfels, 2007).

Der WBGU legt bei der qualitativen Bewertung des allgemeinen Geschäftsklimas im Kontext der Bioenergieproduktion folgenden Maßstab an: ab GCI 5,50 = sehr gutes Geschäftsklima; 4,50–5,49 = gutes Geschäftsklima; 3,50–4,49 = schwieriges Geschäftsklima; unter 3,50 ungeeignetes Geschäftsklima. Der aktuelle Höchstwert der erfassten Länder liegt bei 5,67 (USA), der Tiefstwert bei 2,78 (Tschad).

schrittliche Agrartechnologien weltweit verfügbar sind und flächendeckend eingesetzt werden. Daher ist davon auszugehen, dass das tatsächliche und nachhaltige Biomassepotenzial im Bereich der unbewässerten Szenarien liegen dürfte und nur geringe Steigerungen durch teilweise Bewässerung möglich sind. So können die hohen Erntepotenziale mit Bewässerung im Übergangsbereich zwischen semi-ariden und humido-ariden Gebieten Afrikas wohl kaum innerhalb weniger Jahrzehnte weiträumig realisiert werden.

6.7 Regionale Betrachtung

Die in Kapitel 6.5.4 gezeigte räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen weist auf der Grundlage der gegebenen naturräumlichen Bedingungen einige Regionen aus, die grundsätzlich besonders gut für den nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen geeignet zu sein scheinen. Eine seriöse Einschätzung der tatsächlich realisierbaren Potenziale muss aber neben den naturräumlichen Gegebenheiten auch die sozioökonomischen und politischen Rahmenbedingungen in den einzelnen Regionen berücksichtigen. Die für den Anbau von Energiepflanzen günstig gelegenen Regionen liegen überwiegend in tropischen und subtropischen Breiten. Einige dieser Länder sind durch einen niedrigen Entwicklungsstand sowie schwache und fragile staatliche Strukturen geprägt oder von andauernden Gewaltkonflikten betroffen. Vor diesem Hintergrund sind allzu optimistische Erwartungen bezüglich der Mobilisierung der Bioenergiepotenziale in manchen Regionen zu korrigieren. Gleichwohl kann das Bemühen, die Bioenergiepotenziale gerade in wenig entwickelten Regionen zu realisieren, mittel- und langfristig auch zu agrarwirtschaftlich angetriebener Entwicklungsdynamik führen und somit zu einer Verbesserung der soziökonomischen Rahmenbedingungen beitragen.

In dieser Hinsicht sind nach Einschätzung des WBGU drei Kontextfaktoren von besonderer

Bedeutung. Erstens erfordert eine Realisierung der theoretischen Bioenergiepotenziale ein Mindestmaß an Investitionstätigkeit, die wiederum ohne ein Mindestmaß an Sicherheit und Stabilität nicht zu erwarten ist. Wo Sicherheit und Stabilität nicht gegeben sind und auch absehbar nicht gewährleistet werden können, besteht keine geeignete Grundlage für den Aufbau einer dynamischen Bioenergiewirtschaft. Zweitens erfordert eine rasche Inwertsetzung der Bioenergiepotenziale gewisse infrastrukturelle und logistische Kapazitäten, die in vielen Entwicklungsländern nur schwach entwickelt sind. Auf Grund der spezifischen Standortnachteile bleiben manche Entwicklungsländer deshalb trotz positiver Handlungsansätze interner und externer Akteure weitgehend abgekoppelt von der weltwirtschaftlichen Dynamik (Collier, 2007). Drittens ist bei der tatsächlichen Realisierbarkeit von Bioenergiepotenzialen im Sinne des WBGU auch die Fähigkeit zur Einhaltung der Nachhaltigkeitsleitplanken zu berücksichtigen (Kap. 3). Dies wiederum setzt nicht nur Sicherheit und Stabilität sowie eine leistungsfähige Infrastruktur voraus, sondern erfordert darüber hinaus ein Mindestmaß an staatlicher Regulierungskompetenz, um einen angemessenen ordnungsrechtlichen Rahmen definieren und seine Einhaltung überwachen und durchsetzen zu können. In waldreichen Ländern, die schon heute hohe Entwaldungsraten aufweisen, ist das Fehlen durchsetzungsfähiger Regulierungskompetenz ein besonders kritischer Faktor. Zusätzliche ökonomische oder politische Anreize zum Anbau von Energiepflanzen könnten dort ohne wirksame Kontrolle verheerende Auswirkungen für den Schutz der biologischen Vielfalt und des Klimas haben und somit einer nachhaltigen Realisierung von Bioenergiepotenzialen zuwider laufen (Kap. 5.5.1.1).

Zur qualitativen Bewertung der Frage, inwieweit die gegebenen politischen, institutionellen und sozioökonomischen Gegebenheiten in einem Land die Realisierbarkeit der theoretisch möglichen Bioenergiepotenziale einschränken, orientiert sich der WBGU konkret am „Failed State Index“ des Fund for Peace und der Zeitschrift *Foreign Policy,* am „Global Competitiveness Index“ des World Economic Forum (Kasten 6.7-1) sowie an den Erwartungen, die sich aus den in Kapitel 3 formulierten Nachhaltigkeitsleitplanken für die jeweiligen Länder und Regionen ergeben.

Abbildung 6.7-1
Potenzialregionen für Bioenergie mit Ländern, die von fragiler Staatlichkeit oder Staatszerfall betroffen sind. Die Karte zeigt die räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen im Jahr 2050 für ein WBGU-Szenario mit geringem Agrarflächenbedarf und hohem Biodiversitätsschutz im unbewässerten Anbau (Szenario 3). Ein Pixel entspricht 0,5° x 0,5°. Zur Einschätzung der Realisierbarkeit der identifizierten nachhaltigen Bioenergiepotenziale wurde die Governance-Qualität einzelner Länder auf Grundlage des Failed State Index (FSI) herangezogen. Die hellrot gefärbten Länder haben einen FSI > 90, so dass dort kurz- bis mittelfristig kaum Chancen für eine Realisierung der Potenziale gesehen werden.
Quelle: WBGU unter Verwendung von Daten aus Beringer und Lucht, 2008 und Foreign Policy, 2008

Nachfolgend werden die Regionen, die mit Blick auf ihre theoretisch zu erschließenden nachhaltigen Bioenergiepotenziale von besonderem Interesse sind, entsprechend bewertet. Wenngleich die dazu herangezogenen Indikatoren nur die Gegenwart abbilden können und bestenfalls Trendaussagen für die nahe Zukunft zulassen, so erlauben sie doch eine über die rein naturräumliche Betrachtung hinausgehende Einschätzung der regionalen Produktionsbedingungen für Bioenergie. Da wesentliche strukturelle Veränderungen kurzfristig kaum zu erwarten sind, ist in Ländern, die in diesen Indizes schlecht abschneiden, auch mittelfristig nur von einer eingeschränkten oder sogar stark eingeschränkten Realisierbarkeit der Bioenergiepotenziale auszugehen. Dies ist bei der nachfolgenden Interpretation der Modellierung und Annahmen über die tatsächlichen Potenziale der Bioenergie in einem nachhaltigen globalen Energiesystem zu berücksichtigen.

Bei der qualitativen regionalen Bewertung der nachhaltigen Bioenergiepotenziale auf Grundlage der beiden genannten Indizes beschränkt sich der WBGU auf sechs der zehn für die vorangegangene Modellierung identifizierten Regionen: Lateinamerika und Karibik (LAM), Afrika südlich der Sahara (AFR), China und angrenzende Länder (CPA), Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS), Pazifisches Asien (PAS) und Südasien (SAS; Abb. 6.7-1). Die übrigen Regionen werden hier nicht berücksichtigt, da entweder die theoretischen Bioenergiepotenziale eher niedrig sind (z.B. Naher Osten und Nordafrika, MEA) oder die volkswirtschaftliche und staatliche Leistungsfähigkeit absehbar als gegeben betrachtet werden kann, wie z.B. Nordamerika (NAM) mit theoretisch möglichen Potenzialen von 5–15 EJ pro Jahr und Europa (EUR) mit ebenfalls 5–15 EJ pro Jahr (Kästen 4.1-2 und 4.2-3).

6.7.1 Lateinamerika und Karibik

Die größten Hoffnungen bezüglich einer großskaligen Bioenergieproduktion ruhen auf der lateinamerikanischen Großregion, in der in weiten Teilen ideale naturräumliche Bedingungen gegeben sind. Die theoretische Größenordnung der nachhaltigen Bioenergiepotenziale Mittel- und Südamerikas reichen von 8 EJ jährlich im ungünstigsten Fall (Szenario 1 unbewässert) bis zu 25 EJ jährlich (Szenario 4 bewässert). Dies entspricht 22–24 % des modellierten globalen Potenzials. Von politisch instabilen Ausnahmen wie Kolumbien, Bolivien und Haiti abgesehen, sind hier auch die politischen, institutionellen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen vergleichsweise gut (Faust, 2007). Brasilien und Argentinien, die zusammen über die Hälfte sowohl der Fläche als auch der Bevölkerung Südamerikas repräsentieren, werden im Failed State Index mit 67,6 bzw. 41,4 bewertet. Mit Blick auf die Wettbewerbsfähigkeit weisen die meisten Länder der Region, die zudem den weitaus größten Teil des Territoriums und der Bevölkerung auf sich vereinen, GCI-Werte von etwa 4 auf, wobei der Durchschnittswert der im GCI erfassten mittel- und südamerikanischen Länder bei 3,87 liegt. Während Chile mit einem GCI-Wert von 4,77 in der Bewertung des World Economic Forum vor Industrienationen wie Spanien (4,66), Italien (4,36) und Griechenland (4,08) liegt, und die regionalen Vormächte Mexiko (4,26) und Brasilien (3,99) klar über dem Schnitt liegen, bleiben von den größeren lateinamerikanischen Staaten lediglich Venezuela (3,63) und Bolivien (3,55) deutlich darunter. In Bolivien ist zudem die weitere politische Entwicklung schwer abzuschätzen. Gemessen am Failed-State-Index (84,2) befand sich das Land schon vor den gewaltsamen Unruhen vom Herbst 2008 an der Grenze zur Instabilität.

Im direkten Vergleich der Entwicklungsländer-Regionen sind die sozio-ökonomischen und politischen Bedingungen zur Realisierung der theoretischen Bioenergiepotenziale in Süd- und Mittelamerika relativ günstig. Brasiliens rasanter Aufstieg zum Weltmarktführer der Bioethanol-Produktion unterstreicht dies (Kasten 8.2-4). Gleichwohl sind auch in Mittel- und Südamerika zwei Herausforderungen zu berücksichtigen, um das Bioenergiepotenzial in nachhaltige Bahnen zu lenken. Erstens müssen bedeutsame Nutzungskonflikt mit der Konservierung der Regenwälder berücksichtigt werden. Allein Brasilien verursacht rund ein Fünftel der globalen Treibhausgasemissionen aus Entwaldung und weist damit weltweit den zweithöchsten Wert auf. Ferner gehören mit Peru (8.) und Venezuela (10.) zwei weitere südamerikanische Staaten zu den Ländern mit den weltweit höchsten Entwaldungsraten (Kap. 5.5.1.1; Abb. 5.5-1). Es müssen also Strategien entwickelt werden, um die Entwaldungsraten in diesen Ländern zu senken und zu vermeiden, dass der zunehmende Anbau von Bioenergiepflanzen den Nutzungsdruck auf die vorhandenen Waldflächen weiter erhöht. Zweitens sollten in dieser Region, insbesondere in Zentralamerika, Bioenergiestrategien grundsätzlich durch Politiken zur Ernährungssicherheit und zur Vermeidung der Verdrängung der Nahrungsmittelproduktion durch Bioenergiepflanzen flankiert werden. Hinzu kommt, dass ein großflächiger agrarindustrieller Ausbau von Bioenergieplantagen zukünftig durch vermehrte und intensivere Sturm- und Flutereignisse in Folge des Klimawandels behindert werden könnte (WBGU, 2007).

6.7.2
China und angrenzende Länder

Die theoretische Größenordnung der nachhaltigen Bioenergiepotenziale Chinas einschließlich Hongkongs und der angrenzenden asiatischen Ökonomien reichen von 4 EJ jährlich im ungünstigsten Fall (Szenario 1 unbewässert) bis zu 15 EJ jährlich (Szenario 4 bewässert), entsprechend etwa 12–13 % des globalen Potenzials oder 5–20 % des chinesischen Primärenergiebedarfs von 72,9 EJ im Jahr 2005 (IEA, 2007d). Maßgeblich ist dabei China, für das die Modellierung Potenziale von 4 EJ bzw. 13 EJ ergibt, also jeweils knapp 90 % der Potenziale der gesamten Region.

Die sozioökonomischen und institutionellen Bedingungen für eine nachhaltige Mobilisierung des Bioenergiepotenzials in China sind dann günstig, wenn Anstrengungen unternommen würden, die vom WBGU vorgeschlagenen Leitplanken und Nachhaltigkeitsstandards einzuführen und umzusetzen, wobei insbesondere die Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion zu berücksichtigen wäre (Kasten 5.2-2). Der Failed State Index notiert China gegenwärtig mit einem Wert von 80,3 und verweist damit auf die Gefahr politischer Instabilität. Zugleich erweist sich die chinesische Regierung in der Wirtschaftspolitik als handlungsfähig und in der Umweltpolitik als zunehmend sensibel. Der Global Competitiveness Index reflektiert die wirtschaftliche Dynamik der vergangenen drei Dekaden mit einem Wert von 4,57, so dass die Volksrepublik in dieser Bewertung auf Augenhöhe mit Ländern wie Tunesien (4,59), Tschechien (4,58) und Saudi Arabien (4,55) liegt. Sollten sich die chinesische Regierung und nationale sowie internationale Unternehmen zu einer konsequenten Nutzung der bioenergetischen Potenziale entschließen, spricht grundsätzlich nichts dagegen, dass die dazu nötigen Investitionen getätigt und entsprechende Kapazitäten aufgebaut werden. Angesichts des hohen Wachstums der Energienachfrage in China wäre die Bioenergie ein Element einer klimaverträglicheren Wachstumsstrategie, insbesondere wenn durch deren Ausbau die Nutzung der fossilen Energieproduktion (insbesondere durch die Verbrennung von Kohle) begrenzt werden könnte.

6.7.3
Pazifisches Asien

Die theoretische Größenordnung der nachhaltigen Bioenergiepotenziale im pazifischen Südostasien reicht von 1 EJ jährlich im ungünstigsten Fall (Szenario 1 unbewässert) bis zu 11 EJ jährlich (Szenario 4 bewässert) und entspricht damit etwa 2–9 % des modellierten globalen Potenzials für den Energiepflanzenanbau. Die Spanne zwischen den Szenarien ist hier im Vergleich zu den meisten modellierten Regionen besonders groß, was am hohen Anteil von Flächen liegt, die in den restriktiveren Szenarien für den Schutz der Biodiversität reserviert werden.

Einige südostasiatische Schwellenländer betreiben schon heute einen umfangreichen Bioenergieanbau. Insbesondere Malaysia und Indonesien (Kasten 5.4-2) haben sich in den vergangenen Jahren zu den beiden weltweit führenden Produzenten von Palmöl entwickelt, wobei Plantagen überwiegend auf Kosten des tropischen Regenwaldes angelegt werden und kaum als nachhaltig bewertet werden können (FWA, 2007). Ein signifikanter zukünftiger Ausbau nachhaltiger Bioenergiepotenziale in der pazifisch-asiatischen Region auf 11 EJ pro Jahr ist nach Einschätzung des WBGU überhaupt nur möglich, wenn der Agrarflächenbedarf gering ist und ein geringer Biodiversitätsschutz toleriert wird (Szenario 4). Für die restriktiveren Szenarien ergibt die Modellierung nachhaltige Potenziale von nur 1 EJ bis maximal 7 EJ (Szenario 3) pro Jahr.

Die gegenwärtigen politischen, institutionellen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen in der Region ergeben ein gemischtes Bild (Faust und Croissant, 2008). So werden in der südostasiatischen Region auch Transformationsstaaten, deren politische Stabilität als fraglich gelten kann, vergleichsweise gute Investitions- und Geschäftsbedingungen zugeschrieben. Dies gilt etwa für die Inselreiche Indonesien (FSI-Wert 83,3; GCI-Wert 4,24) und die Philippinen (83,4; 3,99) oder auch für Thailand (75,6; 4,70). Über die besten Rahmenbedingungen für einen weiteren Bioenergieausbau in der Region verfügt indes Malaysia (FSI-Wert 67,2), dessen autoritäre Wahlmonarchie stabil und handlungsfähig ist und dessen globale Wettbewerbsfähigkeit mit einem GCI-Wert von 5,10 annähernd so stark eingeschätzt wird, wie die Australiens (5,17). Schon heute treibt die malaysische Regierung den Ausbau der Palmölindustrie aktiv voran, um die Weltmarktführerschaft auszubauen und den Wertschöpfungsgrad in der Weiterverarbeitung zu verbessern (FWA, 2007). Negative Effekte hinsichtlich des Klimaschutzes, der Artenvielfalt oder der Preisentwicklung des Grundnahrungsmittels Palmfett, spielen dabei praktisch keine Rolle. Eine nachhaltige Realisierung der Bioenergiepotenziale in Malaysia, aber auch in Indonesien (Kasten 5.4-2) und anderen südostasiatischen Ländern, würde erhebliche politische Korrekturen erfordern, die gegenwärtig nicht absehbar sind.

Kasten 6.7-2

Länderstudie Indien – Die Nutzung marginaler Flächen für die Biokraftstoffproduktion

Indiens Biokraftstoffstrategie im Bereich Biodiesel basiert auf ölhaltigen, nicht essbaren Pflanzen bzw. Früchten. Im Unterschied zu Ländern wie Malaysia, Indonesien oder Brasilien, wo Biokraftstoffe auf fruchtbaren Böden oder gerodeten Waldflächen angebaut werden, setzt Indien auf die Nutzung marginaler Flächen („wasteland"; Kasten 4.2-1). Obgleich einheitliche Definitionen sich als schwierig erweisen, wird darunter landwirtschaftlich schlecht genutztes bzw. minderwertiges und degradiertes Land verstanden. Im indischen Wasteland Atlas werden von der gesamten Landfläche 17 % (55,2 Mio. ha) als marginal eingestuft, wobei je nach Beschaffenheit der Böden 13 Kategorien unterschieden werden. Davon gelten 32 Mio. ha als grundsätzlich kultivierbar (Ministry of Rural Development, 2003). Im Vergleich dazu: Durch die WBGU-Szenarien werden für Indien zwischen 28 und 32 Mio. ha ausgewiesen. 17,4 Mio. ha hält die indische Regierung für den *Jatropha*-Anbau geeignet (Planning Commission, 2003). Um das diskutierte nationale Ziel einer 20 %-igen Biodiesel-Beimischung bis 2030 zu erreichen, müssten laut Berechnungen des indischen Forschungsinstituts TERI und der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) sogar 38 Mio. ha unter Anbau gebracht werden (antizipierte Biodieselnachfrage 2030 ca. 203 Mio. t gegenüber 66 Mio. t in 2010). Zudem müssten die derzeitigen Erträge bis um das Fünffache von 1–2 t/ha auf 5 t/ha gesteigert werden (TERI und GTZ, 2005). Gegenwärtig werden 62 % der gesamten Landfläche Indiens landwirtschaftlich genutzt. Die bewaldeten Flächen nehmen 22 % ein (Stand 2000; Ministry of Agriculture, 2008) und sollen bis 2012 auf ein Drittel erhöht werden (MoEF, 2006). Gleichzeitig nimmt die Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Flächen aufgrund von Besiedlung, industrieller Nutzung und Degradation ab. Brennholznutzung, ein großer Viehbestand und klimatische Veränderungen verschärfen diese Bodendegradation zusätzlich. Um die Nahrungsmittelnachfrage aus eigenen Kräften bedienen zu können, müsste die Produktivität der indischen Nahrungsmittelproduktion in den kommenden beiden Dekaden um über 50 % gesteigert werden (TERI und GTZ, 2005). Im September 2008 hat die indische Regierung nach langen internen Diskussionen eine neue Biokraftstoffpolitik beschlossen. Die 20 % Beimischungsquote für Biodiesel wurde bestätigt, allerdings soll dieses Ziel bereits 2017 erreicht werden (Economist, 2008b). Wie solche ambitionierten Biokraftstoffziele in einem der am dichtesten besiedelten Länder der Welt angesichts der bestehenden Nutzungsdichte und ohne weiteren Druck auf die Nutzflächen bewerkstelligt werden können, erscheint fraglich.

Welcher Anteil der indischen marginalen Flächen tatsächlich zum Anbau von *Jatropha* und ähnlichen Ölpflanzen genutzt werden kann, hängt außerdem nicht nur von biophysikalischen Größen ab, sondern auch von den Land- und Nutzungsrechten. Indien weist weltweit die größte Zahl an ländlichen Armen und Landlosen aus. Der mangelhafte Zugang großer Teile der ländlichen Bevölkerung zu nutzbarem Boden sowie die Missachtung bestehender Land- und Nutzungsrechte stellen bereits heute ein Entwicklungshemmnis und einen kritischen politischen Faktor in der indischen Demokratie dar (Hanstad et al., 2008). Die für den *Jatropha*-Anbau vorgesehenen marginalen Flächen sind häufig staatliches bzw. Gemeindeland, das von den Landlosen zum Sammeln von Brennholz und als Weideland genutzt wird. Eine großflächige Verpachtung solcher Ländereien an Agrarunternehmen würde ohne Mitspracherechte der ländlichen Armen und Landlosen wahrscheinlich zur Verdrängung führen. Zudem sind Landnutzungsrechte oft nicht geklärt, denn offizielle Landtitel unterscheiden sich stark von der realen, gewohnheitsrechtlichen Nutzung. Auch mangelt es an genauen Zahlen, wie viele Menschen in diesen Gebieten leben.

Tatsächlich zeichnen sich in einzelnen indischen Bundesstaaten bereits heute Konflikte um die Landfrage und die großzügige staatliche Unterstützung von privaten Unternehmen im Zusammenhang mit dem *Jatropha*-Anbau ab (Grain, 2008; Peoples Coalition, 2008; Shiva, 2008). Lokale partizipative Verfahren funktionieren nur unzureichend, wodurch die Gefahr der Vertreibung steigt. Auf lokaler Ebene begünstigt Korruption eine faktische Privatisierung von Gemeindeland; vereinzelt werden Landflächen, die von der Regierung speziell für den Anbau von *Jatropha* zur Verfügung gestellt wurden, in der Praxis für andere Zwecke genutzt (Altenburg et al., 2008). Um die Potenziale der marginalen Flächen für den Energiepflanzenanbau zu nutzen und soziale Verwerfungen zu verhindern, müssen deshalb gerade diese sozialen und politischen Aspekte im Bereich der Landnutzung beachtet werden (TERI und GTZ, 2005; Cotula et al., 2008). Die Modellierungsergebnisse erscheinen deshalb vor dem Hintergrund der tatsächlich zur Verfügung stehenden Anbauflächen für Energiepflanzen und der sozialen Risken als eher zu optimistisch.

6.7.4 Südasien mit Indien

Die theoretische Größenordnung der nachhaltigen Bioenergiepotenziale Südasiens reicht von 2 EJ jährlich im ungünstigsten Fall (Szenario 1 unbewässert) bis zu 4 EJ jährlich (Szenario 4 bewässert) und entspricht damit etwa 3–6 % des modellierten globalen Potenzials. Dabei entfällt jeweils der weitaus größte Anteil mit 2 EJ (Szenario 1 unbewässert) bzw. 3 EJ (Szenario 4 bewässert) auf Indien, was 9–18 % des indischen Primärenergiebedarfs von 22,5 EJ im Jahr 2008 entspricht (IEA, 2007d).

Allein Indien mit seiner Gesamtfläche von rund 3,3 Millionen Quadratkilometern bietet große, zum Teil marginale Flächen, die grundsätzlich zur nachhaltigen Bioenergieproduktion geeignet sind. Politisch und wirtschaftlich gibt es zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen den indischen Bundesstaaten, die in manchen Landesteilen zu Einschränkungen bei der Realisierbarkeit dieser Potenziale führen und in anderen Landesteilen rasche Fortschritte ermöglichen könnten. Dies gilt insbesondere dort, wo die Produktion von Bioenergiepflanzen schon heute gezielt auf Ebene der Bundesstaaten gefördert wird (Kasten 6.7-2).

Insgesamt wird die Republik Indien mit einem FSI-Wert von 72,9 bewertet (Kasten 6.7-2). Im globalen Vergleich der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit liegt sie mit einem GCI-Wert von 4,33 in etwa gleichauf mit anderen Schwellenländern wie Südafrika (4,42) und Mexiko (4,26). Indien verfügt damit grundsätzlich über relativ günstige Ausgangsbedingungen zur Mobilisierung seines Bioenergiepotenzials, auch wenn dieses bescheidener ausfallen dürfte, als die Ergebnisse der Modellierung des technischen Bioenergiepotenzials oder die Planungen der indischen Regierung (Kasten 6.7-2). Ob eine nachhaltige Bioenergiestrategie gelingt, ist vor allem von dem politischen Willen abhängig, Nachhaltigkeitsstandards zu berücksichtigen und parallel zur Entwicklung einer Bioenergiestrategie Anstrengungen zur Ernährungssicherung weiterzuverfolgen. Zudem gilt es die Rechte arme Bevölkerungsgruppen zu berücksichtigen, die auf vielen marginalen Flächen leben, um Landkonflikte zu vermeiden.

6.7.5 Afrika südlich der Sahara

Die theoretische Größenordnung der nachhaltigen Bioenergiepotenziale Afrikas südlich der Sahara reicht von 5 EJ jährlich im ungünstigsten Fall (Szenario 1 unbewässert) bis zu 14 EJ jährlich (Szenario 4 bewässert) und beträgt damit 12–15 % des globalen Potenzials. Die naturräumlichen Unterschiede innerhalb dieser Makroregion sind enorm, wie ein Vergleich z.B. des tropisch feuchten Kongobeckens mit den ariden und semi-ariden Territorien der südafrikanischen Staaten veranschaulicht. Zudem nimmt die Republik Südafrika als regionale Vormacht und größte Volkswirtschaft des Kontinents eine Sonderstellung ein. Die größten Potenziale für die Bioenergieproduktion werden im Sahelgürtel, insbesondere in Nigeria, Mali und im Sudan, sowie in Teilen Ost- und Südostafrikas gesehen.

Stellt man diesen Potenzialberechnungen die gegenwärtigen politischen, institutionellen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen in der Region gegenüber, so ist kaum zu erwarten, dass die theoretischen Potenziale mittelfristig auch nur annähernd realisierbar sind. Elf der zwanzig von Foreign Policy als besonders kritisch eingestuften Staaten liegen in Afrika südlich der Sahara, darunter mit dem Sudan (FSI-Wert 113,0), dem Tschad (110,9) und der Demokratischen Republik Kongo (106,7) auch die drei größten Flächenstaaten der Region mit zusammen mehr als sechs Millionen Quadratkilometern. Die Stabilität weiterer fünfzehn Staaten südlich der Sahara gelten als akut gefährdet, darunter landwirtschaftlich bedeutsame Staaten wie Kenia (93,4) und Kamerun (91,2). Die Perspektiven für eine politische und wirtschaftliche Konsolidierung der Region sind insgesamt eher skeptisch einzuschätzen beziehungsweise verharren auf niedrigem Niveau (Grimm und Klingebiel, 2007). Für Subregionen wie den Sahelraum, das Horn von Afrika und das südliche Afrika kommt hinzu, dass diese durch die Folgen des Klimawandels und anhaltend hohe Nahrungsmittelpreise absehbar zusätzlich unter Druck geraten und in ihrer Steuerungsfähigkeit eingeschränkt werden (Bauer, 2007; WBGU, 2007).

Vor dem Hintergrund der prekären politisch-institutionellen Verhältnisse sind auch Geschäftsbedingungen und Wettbewerbsfähigkeit der Region kritisch zu betrachten (vgl. Altenburg und von Drachenfels, 2007). So finden sich auf den untersten zehn Rängen des Global Competitive Index acht Staaten aus Afrika südlich der Sahara mit GCI-Werten zwischen 3,29 (Zambia) und 2,78 (Tschad). Allein Südafrika erreicht mit einem GCI-Wert von 4,42 das obere Drittel der GCI-Rangliste.

Die Demokratische Republik Kongo, Zambia und Nigeria sind zudem die Länder mit der weltweit fünft-, sechst- und siebthöchsten Entwaldungsrate (Kap. 5.5.1.1; Abb. 5.5-1), so dass dort auch mit Blick auf die Nachhaltigkeitsleitsplanken zum Klimaschutz und zur biologischen Vielfalt die Voraussetzungen für einen Ausbau einer nachhaltigen Bioenergieproduktion kaum gegeben sind. Eine ernstzunehmende Kontrolle des Holzeinschlags kann in diesen Staaten wie auch in den anderen waldreichen Ländern West- und Zentralafrikas absehbar nicht erwartet werden. Dennoch sollten in Ländern in der Subsahara-Region, die durch vergleichsweise günstige institutionelle Strukturen geprägt sind, wie z.B. Mali, oder große Hoffnungen in den Anbau von Energiepflanzen setzen, wie z.B. Mosambik (Namburete, 2006), die spezifischen Möglichkeiten zur Mobilisierung nachhaltiger Bioenergieproduktion ausgeleuchtet werden.

6.7.6 Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS)

Die theoretische Größenordnung der nachhaltigen Bioenergiepotenziale auf dem Territorium der früheren Sowjetunion reicht von 2 EJ jährlich im ungünstigsten Fall (Szenario 1 unbewässert) bis zu 9 EJ jährlich (Szenario 4 bewässert). Dies entspricht 7–8 % des globalen Potenzials.

Auch in dieser Großregion ergibt die Frage nach den sozioökonomischen Rahmenbedingungen und der politischen Stabilität ein gemischtes Bild. Russland (FSI-Wert 79,7; GCI-Wert 4,19), Kasachstan (72,4; 4,14) und insbesondere die Ukraine (70,8; 3,98)

Kasten 6.8-1

Potenzial der Minderung der atmosphärischen CO_2-Konzentration durch Bioenergienutzung mit CO_2-Sequestrierung

Die Kombination von Bioenergienutzung mit der Abscheidung und Einlagerung von CO_2 wird zunehmend als Option gesehen, der Atmosphäre in Zukunft wieder CO_2 zu entziehen. Im Folgenden wird daher eine Abschätzung vorgenommen, um wie viel die atmosphärische CO_2-Konzentration durch solche Maßnahmen gesenkt werden können.

Die Modellierungsergebnisse deuten auf ein nachhaltiges Bioenergiepotenzial aus Energiepflanzen von etwa 30–120 EJ pro Jahr. Dies entspricht einer jährlichen Kohlenstofffixierung von 1–3 GtC in der Biomasse, die für die Energieerzeugung genutzt werden kann. Dabei handelt es sich zunächst um ein rein theoretisches Potenzial: Der WBGU geht davon aus, dass aufgrund sozioökonomischer und politischer Rahmenbedingungen nur die Hälfte dieses Potenzials tatsächlich realisiert werden kann (Kap. 6.8). Addiert man zu diesem Potenzial noch ein angenommenes technisches nachhaltiges Reststoffpotenzial von etwa 50 EJ, wobei auch hier angenommen wird, dass die Hälfte realisierbar ist (d.h. zusätzlich 0,6 GtC), stünde jährlich insgesamt Biomasse mit einer gespeicherten Kohlenstoffmenge von 1–2 GtC zur Verfügung.

Wie viel von diesem Kohlenstoff letztlich sequestriert werden kann, hängt vom Nutzungspfad ab. Wird die Biomasse über den Pfad der Vergasung oder der Vergärung in Methan gewandelt, müssen ca. 40 % des Kohlenstoffs in Form von CO_2 ohnehin abgetrennt werden und stehen so direkt für eine Speicherung zur Verfügung. Höhere Anteile können abgetrennt werden, wenn die Biomasse in Wasserstoff umgewandelt oder zur Erzeugung von Elektrizität eingesetzt wird. Rhodes und Keith (2005) beschreiben ein Modellsystem zur Energieerzeugung aus Biomasse bei dem bis zu 55 % des Kohlenstoffs sequestriert werden können. Der WBGU geht davon aus, dass bei einer Ausrichtung der Bioenergienutzung auf eine möglichst hohe Sequestrierungsquote eine flächendeckende Abtrennung von bis zu 50 % des gespeicherten Kohlenstoffs möglich sein könnte. Damit stünden jährlich ca. 0,5–1,0 GtC für die Sequestrierung zur Verfügung.

Wie würde sich eine solche Sequestrierungsrate auf die Atmosphäre auswirken?

In der Atmosphäre entspricht 1 ppm CO_2 einem Wert von 2,123 GtC. Entzieht man der Atmosphäre 2 GtC, bedeutet dies allerdings nicht, dass die atmosphärische CO_2-Konzentration auch um 1 ppm sinkt. Die Atmosphäre steht in ständigem Austausch mit den Ozeanen und der Biosphäre. Der Effekt, der sich daraus ergibt, lässt sich in einer Überschlagsrechnung abschätzen: Gegenwärtig wird die Hälfte der CO_2-Emissionen aus fossilen Energieträgern relativ rasch zu zwei Dritteln von den Ozeanen und zu einem Drittel von der terrestrischen Biosphäre aufgenommen, so dass nur ca. 50 % des emittierten CO_2 in der Atmosphäre verbleiben. Beide Senkenprozesse sind durch den CO_2-Anstieg selbst angetrieben: Die Senkenfunktion der Ozeane ist eine Reaktion auf den anthropogenen Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration, da die Ozeane nur so lange CO_2 aufnehmen, bis die Partialdrücke zwischen den Ozeanen und der Atmosphäre ausgeglichen sind (WBGU, 2006). Die Senkenfunktion der terrestrischen Biosphäre ist zumindest teilweise über den CO_2-Düngeeffekt durch den CO_2-Anstieg in der Atmosphäre verursacht (House et al., 2002). Geht man dementsprechend in erster Näherung davon aus, dass diese Rückkopplungseffekte auch rückwärts existieren und vernachlässigt Nichtlinearitäten, müsste man der Atmosphäre ca. 4 GtC entziehen um die CO_2-Menge in der Atmosphäre um 2 GtC bzw. die Konzentration um 1 ppm zu senken.

Ähnliche Ergebnisse ergeben sich auch Verwendung einer Modellfunktion, die die atmosphärische Reaktion auf einen Emissionspuls unter Berücksichtigung verschiedene Rückkopplungseffekte beschreibt (Joos, 2002): Bei einer konstanten Sequestrierungsrate über einen Zeitraum von 100 Jahren würden der Atmosphäre nach diesem Modell etwa 40 % der sequestrierten CO_2-Menge effektiv entzogen. Bei einer Sequestrierung von 0,5–1,0 GtC pro Jahr über einen 100-Jahres-Zeitraum läge die atmosphärische CO_2-Konzentration dadurch am Ende 9 ppm bis 18 ppm unter der Konzentration ohne diese Sequestrierung. Bei dieser Abschätzung sind allerdings nichtlineare Effekte wie etwa eine Sättigung der Ozean- oder Biosphärensenke nicht berücksichtigt. Diese könnten möglicherweise dazu führen, dass sich die Sequestrierung etwas stärker auswirkt, und die Reduktion der CO_2-Konzentration 14–28 ppm über einen Zeitraum von 100 Jahren betragen könnte. Zum Vergleich: Der aktuelle jährliche Anstieg der Kohlendioxidkonzentration der Erdatmosphäre beträgt etwa 2 ppm pro Jahr, ist also um etwa einen Faktor zehn größer (IPCC, 2007a).

verfügen durchaus über die sozioökonomischen Bedingungen zur Mobilisierung der Bioenergiepotenziale. Die Ukraine ist traditionell ein wichtiger Agrarproduzent und scheint auch angesichts ihres Brasilien vergleichbaren GCI-Werts durchaus geeignet, optimistische Erwartungen bezüglich der Bioenergieproduktion umsetzen zu können. Fraglich ist in allen genannten Ländern, ob der politische Wille existiert, eine solche Option mit Nachhaltigkeitskriterien zu verbinden. Zudem ist die Region anfällig für politische Krisen und Konflikte und insgesamt relativ instabil (Grävingholt, 2007).

6.8 Interpretation

Die vom WBGU in Auftrag gegebene Modellierung des globalen nachhaltigen Bioenergiepotenzials aus dem Anbau von Energiepflanzen unter Berücksichtigung von Leitplanken für Ernährung und Biodiversitätsschutz ergibt je nach Szenario rechnerisch ein jährliches Potenzial von 34–120 EJ (Kap. 6.5) im Jahr 2050. Angesichts der in Kapitel 6.6 beschriebenen Unsicherheiten und der großen Unterschiede im Potenzial zwischen den Szenarien wird diese Spanne im Folgenden mit 30–120 EJ angegeben. Hierbei handelt es sich um den Bruttoenergiebetrag, d.h. ohne Berücksichtigung von Umwandlungsverlusten bei

der Konversion zur Endenergie. Zu diesem Potenzial aus dem Anbau von Energiepflanzen kommt noch ein Beitrag aus der Verwertung von Reststoffen der Land- und Forstwirtschaft hinzu, der etwa 50 EJ pro Jahr betragen dürfte (Kap. 6.1). Insgesamt beträgt das weltweite nachhaltige Potenzial für die Nutzung von Bioenergie also 80–170 EJ pro Jahr, was unter 10 % des für 2050 zu erwartenden Primärenergiebedarfs entspricht.

Bei der Bewertung dieser Potenzialabschätzung ist zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um ein technisches nachhaltiges Potenzial handelt; das tatsächlich realisierbare Potenzial fällt deutlich geringer aus. Insofern sind die Werte als eine Obergrenze zu interpretieren. Bei der Ermittlung des realisierbaren wirtschaftlichen Potenzials wäre insbesondere die geographische, politische und sozio-ökonomische Situation der einzelnen Regionen (Kap. 6.7) zu berücksichtigen, was naturgemäß für das Jahr 2050 schwierig ist. Als erste grobe Schätzung geht der WBGU davon aus, dass das wirtschaftliche Potenzial etwa bei der Hälfte des technischen nachhaltigen Potenzials liegen könnte, weist aber darauf hin, dass hier noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Bei den hier ermittelten Bioenergiepotenzialen gibt es zudem wahrscheinlich eine schwer quantifizierbare Schnittmenge mit der traditionellen Nutzung von Biomasse, die heute etwa 45 EJ pro Jahr beträgt (Kap. 6.1). In diesem Sinn stellen die beschriebenen Zahlen nicht unbedingt *zusätzliche* Potenziale der Bioenergienutzung, sondern eher ein Gesamtpotenzial dar. Der WBGU geht aber davon aus, dass aufgrund von Effizienzsteigerungen bei der traditionellen Bioenergienutzung und teilweisem Umstieg auf andere Energieformen der Anteil der traditionellen Bioenergienutzung bis zum Jahr 2050 zurückgehen wird.

Ein weiterer Faktor, der die energetische Nutzbarkeit von Biomasse verringern könnte, ist der Bedarf für die stoffliche Nutzung, der bei Abnahme der Ölressourcen zunehmen wird (Kap. 5.3). Schätzungen für die im Jahr 2050 für die stoffliche Nutzung benötigte Menge Biomasse belaufen sich auf etwa 100 EJ pro Jahr (Kap. 6.1). Der heutige Bedarf von etwa 25 EJ pro Jahr (Hoogwijk et al., 2003) wird allerdings auf Flächen erzeugt, die in der Potenzialabschätzung in diesem Kapitel nicht berücksichtigt werden (z.B. bestehende Anbauflächen für Baumwolle und forstwirtschaftlich genutzte Waldflächen), für den zusätzlichen Bedarf von etwa 75 EJ pro Jahr würde die stoffliche Nutzung aber wohl in direkter Konkurrenz zum hier betrachteten Bioenergiepotenzial stehen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass zumindest ein Teil der zunächst stofflich genutzten Biomasse im Rahmen einer Kaskadennutzung später energetisch genutzt werden kann.

In Kapitel 7.3 wird erläutert, dass der Einsatz von Bioenergie aus Pflanzenanbau sowie aus der Nutzung von Abfall- und Reststoffen ohne indirekte Landnutzungsänderungen und mit den besten Energiekonversionsverfahren durch die Substitution fossiler Energieträger bei Einhaltung der Förderstandards Treibhausgasemissionen von 60 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse einsparen kann. In besonders günstigen Fällen kann dieser Wert auch 100 t CO_2eq pro TJ erreichen. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass Energieträger mit hohen spezifischen Emissionen ersetzt werden. Geht man von einem maximalen Bioenergiepotenzial von 80–170 EJ pro Jahr aus, von dem etwa die Hälfte realisierbar sein wird, so entspricht dies also etwa 2–9 Gt CO_2eq oder etwa 1–2 GtC pro Jahr. Dies lässt sich etwa mit den jährlichen anthropogenen Kohlendioxidemissionen aus der Nutzung von fossilen Energieträgern und der Zementproduktion von 32 Gt CO_2eq (8,5 GtC) bzw. aus Landnutzungsänderungen von 6 Gt CO_2eq (1,6 GtC) im Jahr 2007 vergleichen (GCP, 2008). Die jährlichen globalen Emissionen *aller* Treibhausgase betrugen im Jahr 2004 etwa 49 Gt CO_2eq oder etwa 13 GtC (IPCC, 2007c). Projektionen für das Jahr 2050 gehen für die verschiedenen IPCC-Szenarien von jährlichen Treibhausgasemissionen von 50–100 Gt CO_2eq (13–26 GtC) aus IPCC (2000).

Angesichts der hier für das globale Potenzial der Bioenergie ermittelten Zahlen sollte die Bedeutung der Bioenergie daher einerseits nicht überschätzt werden, andererseits ist aber die erwartete Größenordnung signifikant und sollte bei der künftigen Entwicklung der Energiesysteme keinesfalls vernachlässigt werden.

Zudem könnte die Fähigkeit der Pflanzen, der Atmosphäre über die Photosynthese Kohlendioxid zu entziehen eine interessante Klimaschutzoption eröffnen: Kombiniert man die energetische Nutzung von Bioenergie mit der Abscheidung und Einlagerung von CO_2, so könnte dieses Verfahren zur einer Verlangsamung des Anstiegs der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre führen oder, perspektivisch, nach dem Auslaufen der Nutzung fossiler Energieträger zu einer Reduktion der atmosphärischen CO_2-Konzentration beitragen. Allerdings kann die atmosphärische CO_2-Konzentration auf diesem Weg realistisch nur um etwa 0,2 ppm Kohlendioxid pro Jahr gemindert werden (Kasten 6.8-1), wohingegen der mittlere Anstieg der CO_2-Konzentration in den letzten Jahren rund 2 ppm jährlich entspricht (GCP, 2008). Zum Vergleich: Diese technisch realisierbare Sequestrierungsrate liegt deutlich unter den Raten, mit denen die Ozeane (2,3 GtC oder 1,1 ppm CO_2 pro Jahr) und die Landvegetation (3,0 GtC oder 1,4 ppm CO_2 pro Jahr) infolge der gestiegenen CO_2-

Konzentration derzeit der Atmosphäre netto Kohlendioxid entziehen (GCP, 2008).

Angesichts der großen Herausforderung, eine Erwärmung von mehr als 2°C über dem vorindustriellen Niveau zu vermeiden, stellt sich die Frage, ob und mit welchen Mitteln ein größeres nachhaltiges Bioenergiepotenzial realisierbar ist. Aus der Diskussion in Kapitel 6.1 ist klar geworden, dass andere Studien vor allem dann zu deutlich höheren Bioenergiepotenzialen gelangen, wenn sie hohe Ertragssteigerungen auf bestehenden Ackerflächen annehmen und dadurch einen Teil dieser Flächen für den Energiepflanzenanbau verwendbar machen. Zudem definieren die meisten anderen Studien weniger strenge Kriterien für den Biosphärenschutz (Kap. 3). Ein signifikant höheres Bioenergiepotenzial ist also nur dann nachhaltig realisierbar, wenn bislang für die Nahrungsmittelproduktion genutzte Flächen durch Effizienzsteigerungen oder weniger flächenintensive Ernährungsgewohnheiten für den Anbau von Energiepflanzen nutzbar werden. Dies müsste allerdings in einer Weise erfolgen, die die Ernährungssicherheit der wachsenden Weltbevölkerung nicht gefährdet und die Leitplanken für Boden- und Biosphärenschutz nicht verletzt.

Der Flächenbedarf für die künftige Ernährung der Menschheit ist sehr unsicher; er hängt nicht nur vom Bevölkerungswachstum ab sondern auch von der Entwicklung der Ernährungsgewohnheiten, vom technologischen Fortschritt sowie vom Grad der Intensivierung der Agrarproduktion (Kap. 5.2). Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion mit erhöhten Treibhausgasemissionen (beispielsweise aus der Stickstoffdüngung und aus dem Einsatz von Landmaschinen) einhergeht und sich damit klimaschädlich auswirken wird. Zudem erscheint es plausibel, dass für die Sicherung der Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung eher noch zusätzliche Anbauflächen nötig werden könnten, wie dies beispielsweise die FAO prognostiziert (FAO, 2003a).

Eine signifikante Erhöhung des globalen nachhaltigen Bioenergiepotenzials wäre also beispielsweise durch deutliche Effizienzsteigerungen bei der Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln (die allerdings nachhaltig und umweltverträglich sein müsste), vor allem aber durch einen Umstieg auf eine Ernährung mit weniger Fleisch- und Milchprodukten möglich. So sind 69 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen Weideland. Berücksichtigt man zudem den Anbau von Futtermitteln, so werden insgesamt rund 80 % der Landwirtschaftsflächen für die Viehhaltung verwendet (Kap. 5.2). Eine weniger flächenintensive Ernährungsweise könnte daher im Rahmen der hier vorgestellten Modellierung nicht berücksichtigte Ackerflächen frei machen, die für einen nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen genutzt werden könnten. Derzeitige Ernährungstrends laufen allerdings in die entgegengesetzte Richtung (Kap. 5.3).

Insgesamt können die hier vorgestellten Potenziale für die energetische Nutzung von Biomasse also keinen großen, aber doch einen signifikanten Teil der zukünftigen Energieversorgung der Menschheit decken. Bioenergie ist zudem eine interessante strategische Option in einem klimafreundlichen Energiesystem, vor allem wegen ihrer Speicherbarkeit und Nutzbarkeit als Regelenergie. In Kombination mit CO_2-Speicherung können mit Bioenergie sogar negative CO_2-Emissionen, also eine Netto-Sequestrierung, erreicht werden. Dabei muss der Anbau aber alle Nachhaltigkeitskriterien bezüglich Klima-, Boden und Naturschutz sowie Ernährungssicherung erfüllen (Kap. 3). Aufgrund der Vielzahl von Flächen- und Nutzungskonkurrenzen (Kap. 5) sollte die energetische Nutzung von Biomasse außerdem nur mit möglichst effizienten technischen Verfahren erfolgen, um aus der begrenzten Anbaufläche bzw. der begrenzten Menge an energetisch nutzbarer Biomasse die größtmögliche Klimaschutzwirkung zu erreichen. Eine detaillierte Betrachtung und Bewertung verschiedener Anbausysteme und technischer Konversionspfade folgt in Kapitel 7.

Anbau und energetische Nutzung von Biomasse 7

7.1 Anbausysteme zur Produktion von Biomasse für Energiezwecke

Die Anbau- und Bewirtschaftungsmethoden von Energiepflanzenkulturen beeinflussen nicht nur die Produktionsmenge, sondern wirken sich grundsätzlich auch auf die ökologischen Ressourcen und die Atmosphäre aus. Die landwirtschaftlich verursachten Emissionen von Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4)- nahmen zwischen 1990 und 2005 vorwiegend durch die Verbrennung von Biomasse, die Viehhaltung und die Emissionen aus dem Boden um 17 % zu (Smith et al., 2007a). Die jährlichen Emissionen von Treibhausgasen THG ohne Kohlendioxid (CO_2) aus der Landwirtschaft werden auf 5,1–6,1 Gt CO_2eq geschätzt, was ungefähr 10–12 % aller anthropogenen THG-Emissionen entspricht (Smith et al., 2007). Bis im Jahr 2035 muss alleine durch den vermehrten Stickstoff- und Hofdüngereinsatz mit einer weiteren Zunahme der N_2O-Emissionen um 35–60 % gerechnet werden (FAO, 2003a).

In diesem Kapitel stehen die Auswirkungen der großskaligen Bioenergieproduktion auf wichtige Ökosystemleistungen im Vordergrund (Abb. 7.1-1), Vor- und Nachteile unterschiedlicher Anbausysteme werden erläutert und mit Beispielen heute gängiger Bioenergiepflanzen ergänzt.

Es gibt wesentlich mehr Pflanzen, die Biomasse für Energiezwecke liefern (z.B. Sudangras, Pfahlrohr, Rohr-Glanzgras, Topinambur, *Pongamia*, Akazien u.a.), als im Umfang dieses Gutachtens porträtiert werden können (Kasten 7.1-9). Die Auswahl beschränkt sich hier vor allem auf vielversprechende Bioenergiepflanzen, von denen qualitativ und quantitativ genügende Produktionsdaten verfügbar sind, um eine Energie- und THG-Bilanzanalyse vorzunehmen (Kap. 7.3). Auf die Flächenkonkurrenz des Bioenergiepflanzenanbaus mit anderen Landnutzungen wurde bereits in Kapitel 5 eingegangen.

7.1.1 Anbau von Energiepflanzen in Monokultur

Viele Energiepflanzen wie z.B. Zuckerrohr, Mais und Soja werden weltweit in großen Monokulturen angebaut, was zwar eine effiziente Bewirtschaftung und kurzfristig hohe Erträge ermöglicht, aber auch hohe Treibhausgasemissionen (v.a. N_2O, CH_4 und CO_2) durch Bodenbearbeitung und Düngung hervorruft und sich längerfristig negativ auf die Bodenfruchtbarkeit und die Biodiversität auswirkt (Matson et al., 1997; Tab.7.1-1).

Um diese negativen Auswirkungen zu verringern oder von vornherein zu verhindern, gibt es im Ackerbau geeignete Bewirtschaftungspraktiken. So ist in Europa der Rotationsfeldbau oder die Felderwirtschaft weit verbreitet und wird auch für den Bioenergiepflanzenanbau verwendet. Bei diesem Anbausystem werden in einer Fruchtfolge nacheinander unterschiedliche Kulturen angebaut. Dadurch ist die Nährstoffversorgung in der Regel ausgewogener, der Schädlings- und Krankheitsdruck geringer und das Bodengefüge und der Humusgehalt bleiben stabiler als beim Monokulturanbau. Seit der Europäischen Agrarreform von 2005 sind in Deutschland dreijährige Fruchtfolgen zur Erhaltung der organischen Substanz und der Bodenstruktur vorgeschrieben (BEMLV, 2006).

Je nach Anbauzeitpunkt und Ansprüchen der Pflanzen an Temperatur und Wachstumszeit können dem Boden organisches Material und Nährstoffe durch die Saat und das spätere Unterpflügen von Zwischenfrüchten (z.B. Leguminosen, Gras-Klee-Mischungen, Bienenweide usw.) bzw. durch Mulchen oder eine Unterfrucht (z.B. Klee im Weizenfeld) zugeführt werden. Dies ist besonders beim Anbau von Bioenergiepflanzen angebracht, die komplett abgeerntet werden (Energiepflanzen für die zweite Generation von Biotreibstoffen bzw. Biomethan durch Vergasungsprozesse usw.). Mit geeigneten Saatmischungen für Buntbrachen wird zugleich ein wichtiger Beitrag zur Erhaltung der Biodiversität in Agrarökosystemen geleistet. Allerdings erweist sich in semiariden Gebieten der permanente Anbau

Abbildung 7.1-1
Konzeptionelle Darstellung verschiedener Landnutzungsarten und ihre Wechselwirkung mit Ökosystemleistungen. Die Bereitstellung verschiedenster Ökosystemleistungen bei unterschiedlichen Landnutzungen kann mittels einfacher „Blumen"-Diagramme dargestellt werden, wobei der Zustand jeder Ökosystemleistung entlang der entsprechenden Achse angezeigt wird. In dieser qualitativen Darstellung wurden die Achsen nicht mit Einheiten versehen. Zur Anschaulichkeit werden drei hypothetische Landschaften miteinander verglichen: ein natürliches Ökosystem (links), eine intensiv genutztes Ackerland (Mitte) und ein nachhaltig genutztes Ackerland (rechts). Bei den natürlichen Ökosystemen sind viele Ökosystemleistungen außer der Nahrungsmittelproduktion auf sehr hohem Niveau vorhanden. Das intensiv genutzte Ackerland hingegen kann Nahrungsmittel (wenigstens kurzfristig) im Überfluss produzieren, allerdings auf Kosten anderer Ökosystemleistungen. Ein Mittelweg – d. h. eine Bewirtschaftungsweise, die andere Ökosystemleistungen unterstützt – fördert ein breiteres Portfolio an Ökosystemleistungen.
Quelle: Foley et al., 2005

gegenüber dem Rotationsfeldbau mit Brachen als günstiger für die Qualität und den Kohlenstoffgehalt im Boden (Antle et al, 2003; Manley, et al., 2005). Je nach Region muss der Bioenergiepflanzenanbau also wie der übliche Kulturpflanzenbau angepasst und optimiert werden.

Bei einjährigen Ackerkulturen führt das jährliche Umpflügen zur Reduktion von Kohlenstoff (C) im Boden. Um den Verlust von organischer Substanz im Boden zu minimieren und die Bodenoberfläche vor Erosion und damit Degradation zu schützen, sind statt des konventionellen Pflügens alternative Anbautechniken wie reduziertes Pflügen (conservation tillage) oder Nichtpflügen (no tillage) und Stehenlassen oder leichtes/oberflächliches Unterpflügen der Ernterückstände populär geworden, u. a. weil dies eine Möglichkeit zur C-Sequestrierung in Ackerböden darstellt (Batjes, 1998; Paustian et al., 2000). Würde weltweit auf das konventionelle Pflügen verzichtet, könnten bis Mitte dieses Jahrhunderts schätzungsweise 12–25 Gt C-Emissionen vermieden werden (Pacala und Socolow, 2004). Das gemessene Sequestrierungspotenzial der Ackerbewirtschaftung mit Nichtpflügen liegt bei durchschnittlich 160 kg C pro ha und Jahr (Freibauer et al., 2004). Smith et al. (2000) schätzen das jährliche C-Minderungsspotenzial Europas für das Nichtpflügen (inkl. Treibstoffeinsparungen und Zuwachs an organischem Kohlenstoff im Boden) auf insgesamt über 40 Mio. t C. Diese Anbautechniken – besonders Nichtpflügen – eignen sich allerdings nicht für alle Ackerfrüchte und sind zur C-Sequestrierung regional unterschiedlich rentabel, da mit der Reduktion des Bodenumbruchs unter Umständen ein Rückgang der Produktion einhergeht (Manley et al., 2005) und größere N_2O-Emissionen, die bei der Bildung von Makroaggregaten durch eine höhere Denitrifizierungsrate entstehen, den Sequestrierungseffekt aufheben können (Six et al., 2002).

Beim Abbau von mineralischem Stickstoffdünger kann es zur Freisetzung von Lachgas (N_2O) kommen. Ein speziell auf den Nährstoffbedarf und das jeweilige Entwicklungsstadium der Pflanzen angepasstes Düngeregime hilft, Stickstoffverluste zu vermeiden

Tabelle 7.1-1
Vor- und Nachteile des Energiepflanzenanbaus in Monokulturen.
Quelle: WBGU

Vorteile			
Wirtschaftlichkeit	**Bodenqualität**	**THG-Bilanz**	**Ökosystemleistungen**
Spezialisierter, einfacher Maschinenpark	Bei mehrjährigen Kulturen auf marginalem Land sind Erosionsschutz und Bodenverbesserung möglich (abhängig von Bewirtschaftungsintensität)	Durch Maschinenring können Emissionen reduziert werden	Produktion von Nahrung bzw. Bau-/Energiematerial
Wegen großer Mengen günstigere Einkaufspreise für Saatgut, Dünger, Pflanzenschutzmittel			Nährstoffrecycling, Luftreinhaltung, Wasserkreislauf
Einfache Planung und Kalkulation			
Bessere Vermarktungsmöglichkeiten wegen großer Produktionsmengen			
Nachteile			
Wirtschaftlichkeit	**Bodenqualität**	**THG-Bilanz**	**Ökosystemleistungen**
Grosse Abhängigkeit von der Rohstoffnachfrage und politischen Einflüssen (Zölle, Steuern, Subventionen)	Einseitige Nährstoffauszehrung	Hohe CO_2-Verluste durch intensive Bodenbearbeitung; zudem CO_2-Emissionen durch Landmaschinen	Begünstigung von Pflanzenkrankheiten und spezialisierten Schädlingen
Großer Pflanzenschutzmittelverbrauch durch hohes Pflanzenkrankheitsrisiko bis hin zum Totalausfall	Mechanische Belastung durch schwere Maschinen führt zur Bodenverdichtung und starkem Oberflächenabfluss von Wasser	Bei hohen N-Gaben: N_2O-Verluste durch niedrige N-Nutzungseffizienz	Biodiversitätsverlust (ober- und unterirdisch) durch große, monotone Pflanzenbestände und in der Regel großen Einsatz von Pflanzenschutzmitteln
	Großer Bedarf an künstlichem Dünger bedroht Bodenfauna		Geringer Schutz gegenüber abiotischen Umweltfaktoren (Wind, Starkregen, Hagel)
	Grosse Erosionsgefahr		Belastung des Gebietswasserhaushaltes (bei großen Plantagen Tangierung der Trinkwasserversorgung und des Biotopschutzes) Landnutzungskonkurrenz zu Nahrungsmittelanbau

(Crews und Peoples, 2005). Gerade die Stickstoffnutzungseffizienz lässt allerdings global wie auch in Europa weiterhin sehr zu wünschen übrig. Im Durchschnitt werden nur ungefähr 50 % des Stickstoffs aus dem Dünger von den Pflanzen aufgenommen, der Rest tritt gasförmig aus dem Boden aus oder versickert unerreichbar für Wurzeln im tieferen Boden (FAO, 2001b). Bei intensiven Bioenergieanbausystemen muss daher unbedingt ein besonderes Augenmerk auf ein angepasstes Düngeregime gelegt werden (z.B. mittels Stickstoffbilanzen, Präzisionslandwirtschaft usw.).

7.1.1.1 Mehrjährige Kulturen in den Tropen

ZUCKERROHR

Eine sehr weit verbreitete tropische Nutzpflanze, die immer häufiger zur Gewinnung von Ethanol kultiviert wird, ist Zuckerrohr (Kasten 7.1-1). Sie kann ein- oder mehrjährig genutzt werden. Heute wird in ca. 120 tropischen Ländern fast 1,6 Mrd. t Zuckerrohr angebaut. Brasilien war 2007 mit 514 Mio. t der mit Abstand größte Produzent, gefolgt von Indien (356 Mio. t) und China (106 Mio. t). Der durchschnittli-

Kasten 7.1-1

Zuckerrohr *(Saccharum officinarum* L.*)*

Zuckerrohr gehört zu den Süßgräsern, ist mehrjährig und wächst bis zu 7 m hoch. Es stammt ursprünglich aus dem tropischen Südostasien und gelangte mit den europäischen Siedlern nach Amerika. Als Tropenpflanze erträgt Zuckerrohr keinen Frost und braucht für das Wachstum eine Jahresmitteltemperatur von min. 18°C und für Regenfeldbau ohne Bewässerung gute 1.000 mm Jahresniederschlag. Der 2–5 cm dicke Halm der Pflanze enthält ein weiches, Zucker speicherndes Mark. Die Pflanzen sind je nach Anbaugebiet nach 10–24 Monaten erntereif. Wenn die Stoppeln nach der Ernte nicht untergepflügt werden, können die wieder ausgetriebenen Pflanzen mit entsprechender Düngung insgesamt 4–8mal abgeerntet werden. Die Ernteerträge liegen bei 10–120 t Biomasse pro Hektar.

Bei der Ernte werden die Halme geschnitten und von den Blättern befreit. Nach Zerkleinerung werden die Halmstücke zur Zuckergewinnung mehrfach gequetscht und ausgepresst. Der Zuckerrohsaft wird geklärt und durch Aufkochen kristallisiert. Der auskristallisierte Rohzucker wird bis zu einer Reinheit von 99,8 % Saccharose raffiniert. Der zurückbleibende Zuckersirup (Melasse) dient der Alkoholgewinnung durch Vergärung, als Futtermittel oder zur Hefezucht. Die fermentierte Melasse (Vinasse) wird oft zur Düngung zurück auf die Felder gebracht (Lieberei et al., 2007).

Foto: Hannes Grobe, AWI

che globale Biomasseertrag lag 2007 bei 70,9 t pro ha (FAOSTAT, 2007).

Mit dem Zuckerrohranbau sind verschiedene negative Auswirkungen auf die Umwelt verbunden. Kaum eine andere Ackerfrucht führte durch die Umwandlung der Primärvegetation in Ackerflächen zu so großem Biodiversitätsverlust. Im Brasilianischen Staat Alagoas stehen heute nur noch 3 % des Primärwaldes, der Rest wurde zum Anbau von Zuckerrohr abgeholzt (WWF, 2005a). Aber auch Feuchtgebiete gehen und gingen durch die Zuckerrohrproduktion verloren, meist indem ihre nährstoffreichen Böden drainiert werden. In Queensland, Australien, fielen bereits 60–80 % der Süßwasserfeuchtgebiete an der Küste der Zuckerproduktion zum Opfer (WWF, 2005b). Durch die schweren Erntemaschinen wird der Boden verdichtet, die Kultivierung an Steilhängen und die künstliche Bewässerung führen zu Wassererosion und Versalzung des Bodens. In vielen Ländern werden die Zuckerrohrfelder vor der Ernte abgebrannt, um diese zu vereinfachen. Diese Praxis führt nicht nur zur Emission von Treibhausgasen und zur Bodendegradation und damit zu zukünftigen Produktionseinbußen, sondern beeinträchtigt auch die Gesundheit der Bevölkerung (Ribeiro, 2008). Bei der Weiterverarbeitung der abgeernteten Biomasse zu Ethanol fällt kaliumreiche, saure Vinasse (fermentierte Melasse) an, die z.T. in Gewässer geleitet wird und diese aquatischen Ökosysteme gefährdet (Rosebala et al., 2007).

Die Produktion von Zuckerrohr kann mit verschiedenen Maßnahmen optimiert werden. Der Einsatz von effizienten Bewässerungssystemen (Tropfenbewässerung) und Mulch helfen, Wasser zu sparen. Um Wassererosion zu vermeiden, sollte die Steigung im Gelände für die Zuckerrohrproduktion 3 % nicht übersteigen (WWF, 2005a). Wenn die Blätter vor der Ernte abgeschnitten statt abgebrannt und als Mulch verwendet werden, wird der Gehalt an organischer Substanz im Boden erhöht, die Verdunstungsrate gesenkt und die Bodenerosion eingedämmt (WWF, 2005b).

Ölpalme

Die Ölpalme gehört zu den traditionellen Öl- und Energiepflanzen, wobei das Produkt Palmöl gegenwärtig vor allem in der Nahrungsmittel- und Kosmetikindustrie eingesetzt wird (Kasten 7.1-2). Hauptproduzenten und -exporteure für Palmöl sind Malaysia und Indonesien (Produktion 2007 global: 39,3 Mio. t; FAOSTAT, 2007). Beide Länder haben beschlossen, 40 % der Palmölexporte als Treibstoffe auszuführen. Die globale Fläche, auf der Ölpalmen angebaut werden, beträgt lediglich 10 % der Sojaanbauflächen, die globale Produktion ist aber für beide Feldfrüchte vergleichbar. Die FAO rechnet mit einer Verdopplung der Palmölproduktion gegenüber 1999/2001 bis 2030 (FAO, 2006c).

Mit den Ölpalmenkulturen entstehen – vor allem in Indonesien – große ökologische Schäden. Während in Malaysia neue Ölpalmenplantagen nur auf bereits bestehenden Acker- oder Brachflächen errichtet werden dürfen, fallen in Indonesien dem Plantagenanbau oft auf Moorböden stehende Primärwälder zum Opfer (Stone, 2007; Kasten 5.4-2). Über ein Viertel der indonesischen Konzessionen

Kasten 7.1-2

Ölpalme *(Elaeis guineensis* Jacq.)

Die Ölpalme stammt ursprünglich aus Afrika und wird heute im tropischen Amerika und Südostasien kultiviert. Als feuchttropisches Gewächs ist die Ölpalme auf 100 mm Niederschlag monatlich und eine durchschnittliche Temperatur von 24–28°C angewiesen (Minimaltemperatur 15°C, Trockenzeit höchstens drei Monate). Die mehrjährige Pflanze wird bis zu 30 m hoch und trägt Fruchtstände von bis zu 50 kg mit mehreren tausend Früchten. Geerntet werden kann ab dem fünften Jahr, volle Ernten werden ab dem 12.–15. Jahr erreicht. Die Pflanzen können ein Alter von 80 Jahren erreichen. Nach der Ernte werden die schnellverderblichen Früchte sofort mit Wasserdampf behandelt, um ein Fett spaltendes Enzym zu zerstören. Aus dem orangefarbigen Fruchtfleisch wird das Palmöl gewonnen, aus den Kernen das Palmkernöl. Der Ertrag an Palmöl aus dem Fruchtfleisch liegt bei 2,5–5 t pro ha und Jahr (Lieberei et al., 2007).
Foto: Frank Krämer, GTZ

für Ölpalmplantagen wurden für Gebiete auf Moorböden erteilt. Die Produktion von 1 t Palmöl verursacht damit 10–30 t CO_2-Emissionen, die durch die Oxidation der organischen Böden bei der Trockenlegung entstehen (Feuer nicht mit eingerechnet; Hooijer et al., 2006).

Durch die Zerstörung der Urwälder geht zudem der Lebensraum für zahlreiche Pflanzen- und Tierarten verloren (Kap. 5.4). In Sumatra sind drei Viertel der heimischen Fledermausarten verschwunden und weniger als 10 % aller Vögel und Säugetiere der Primärwälder finden in den Plantagen neuen Lebensraum (Stone, 2007). Weiter entstehen bei der Verarbeitung der Palmölfrüchte in Ölmühlen Abwässer, die bei der traditionellen Aufbereitung ebenfalls die Umwelt belasten. Die sehr nährstoffreichen Abwässer werden in große Teiche geleitet, wo der Abbau der organischen Verbindungen unter anaeroben Bedingungen zu großen Methanemissionen führt, die bei einer Verwendung in Biogasanlagen vermieden und einer energetischen Nutzung zugeführt werden können. Für die Produktion von 1 t Palmöl entstehen so zusätzliche THG-Emissionen von umgerechnet 756 kg CO_2eq (Schuchardt, 2007).

Um diese enormen CO_2-Emissionen zu verhindern und biologische Vielfalt zu erhalten, ist es unabdingbar, dass keine weiteren Sumpfwälder auf Moorböden zerstört werden (Hooijer et al., 2006). Wo möglich, sollten die Moorböden renaturiert werden. Im Hinblick auf die CO_2-Einsparung ist die Ölpalmenproduktion auf marginalem Land am effektivsten (Kap. 7.3). Durch nachhaltige Bewirtschaftung der Plantagen (z.B. mit einem verbesserten Wassermanagement) und eine verbesserte Aufbereitung des Palmöls können ebenfalls erhebliche Mengen an Energie und THG-Emissionen gespart werden (WWF, 2007). Das bei der Verarbeitung der Palmölfrüchte anfallende, nährstoffreiche Abwasser kann zusammen mit den leeren und zerkleinerten Fruchtständen in Biogasanlagen genutzt werden (Schuchardt, 2007). Dadurch gehen die Nährstoffe nicht verloren, und es werden kaum Methan und Lachgas freigesetzt.

Jatropha

Das ölhaltige Wolfsmilchgewächs *Jatropha curcas* (auch: Purgiernuss) wird vielfach als neue „Wunderpflanze“ für die Produktion von Biodiesel angepriesen. Die tropische Pflanze ist relativ anspruchslos, wächst in semiariden und ariden Gebieten, aber auch in Gegenden mit höheren Niederschlägen (200–1.500 mm pro Jahr) und kommt auch auf nährstoffarmen Böden vor (Kasten 7.1-3). Der hohe Ölgehalt der Purgiernüsse und der durch die tiefen Wurzeln bedingte Erosionsschutz macht die Pflanze für die Biodieselproduktion auf marginalen Flächen in tropischen Gebieten interessant (Openshaw, 2000; Augustus et al., 2002; Wiesenhütter, 2003; Sirisomboon et al., 2007).

Obwohl die Pflanze vor dem heutigen Anbauboom für die Biodieselproduktion schon sehr vielseitig genutzt wurde (Umzäunung, Bodenstabilisierung, traditionelle Human- und Tiermedizin, Seifenherstellung, Dünger usw.), steht ihre Erforschung noch ziemlich am Anfang. *Jatropha* wurde nicht wie andere Ackerpflanzen domestiziert. Die heute verwendete Pflanze ist eine Wildform, die erst seit wenigen Jahren züchterisch optimiert wird (Rosegrant und Cavalieri, 2008). Für eine rentable Produktion müssen zuerst neue Zuchtsorten entwickelt werden, da die Ernteerträge der Wildform stark variieren und schlecht abschätzbar sind (Fairless, 2007). *Jatropha* gilt als relativ wenig anfällig für Krankheiten und Schädlingsbefall und wird ihres giftigen Milchsaftes wegen vom Vieh (inkl. Ziegen) nicht verbissen (Augustus et al., 2002; Wiesenhütter, 2003). Die bei

Kasten 7.1-3

Jatropha *(Jatropha curcas* L.*)*

Das sukkulente Wolfsmilchgewächs *Jatropha curcas* oder Purgiernuss stammt ursprünglich aus Südamerika und ist heute in allen tropischen Gebieten verbreitet. Es gedeiht auf verschiedenen, auch nährstoffarmen Böden und in unterschiedlichen Klimaverhältnissen. Die Pflanze erreicht innerhalb von drei Jahren eine Höhe von 3–5 m und kann 50 Jahre alt werden. Die Ernteerträge liegen je nach Standort und Wasserverfügbarkeit bei 0.5–12 t pro ha und Jahr. Die Samen haben einen Ölgehalt von ca. 30 % (Openshaw, 2000). Der Presskuchen der Samen enthält ca. 6 % Stickstoff. Der Stickstoffbedarf der Pflanze ist noch nicht abklärend untersucht. Openshaw (2000) empfiehlt, *Jatropha* zusammen mit stickstofffixierenden Bäumen anzupflanzen.
Foto: Meinhard Schulz-Baldes, WBGU

der Gewinnung von Öl anfallenden Pressrückstände der Pflanze sind ebenfalls als Futter ungeeignet und werden als Dünger und zur biologischen Schädlingsbekämpfung verwendet. Falls sich ihre Entgiftung einst rentabel gestaltet, könnten sie als Tierfutter Verwendung finden.

In Indien laufen zurzeit Auspflanzungversuche an, um die Standortansprüche und die Produktivität von verschiedenen Landrassen zu untersuchen. Erste Intercropping-Versuche von ICRISAT zeigen, dass es außerdem möglich ist, zwischen den *Jatropha*-Pflanzen noch weitere Feldfrüchte anzubauen. Für eine ökologische und ökonomische Einschätzung solcher Anbausysteme ist es allerdings noch zu früh. Zwar wächst die Pflanze auch auf marginalen Standorten, um jedoch gute Hektarerträge zu erzielen, ist sie auf gute Böden und genügend Wasser angewiesen (laut ICRISAT bis zu 750 mm Wasser pro Jahr) und konkurriert an solchen Standorten daher mit der Nahrungsmittelproduktion. Dennoch wird die Pflanze als Hoffnungsträgerin für die Produktion von Biodiesel bereits großflächig angebaut (Kästen 6.7-2 und 10.8-1). In Indien sollen bereits zwischen 500.000 und 600.000 ha *Jatropha*-Plantagen existieren, in China sogar 2 Mio. ha (Fairless, 2007). Noch kann Biodiesel aus *Jatropha* jedoch nicht rentabel, d.h. ohne Subventionen, produziert werden (Openshaw, 2000; Wiesenhütter, 2003).

7.1.1.2 Kulturen in Rotation in den gemäßigten Breiten

Mais

Während Mais in Europa und Nordamerika vor allem als Tierfutter angebaut wird (Silomais), zählt er in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern zu den wichtigsten Grundnahrungsmitteln (Körnermais; Kasten 7.1-4). Die globale Körnermaisproduktion lag 2007 bei 785 Mio. t. Die mit Abstand größten Produzenten waren die USA (332 Mio. t oder 42 %

Kasten 7.1-4

Mais *(Zea mays* L.*)*

Das Süßgras Mais ist ursprünglich in Mexiko beheimatet, wo es bereits zwischen 5000 und 3400 v. Chr. angebaut wurde. Die Pflanze wird bis zu 2,5 m hoch und besitzt einen markgefüllten, bis 5 cm dicken Stängel. Nach der Bestäubung durch den Wind wachsen aus den Blattachseln die Kolben, deren Körner je nach Sorte eine goldgelbe, weiße, rote oder schwarzviolette Farbe aufweisen können. Maiskörner bestehen zu ca. 70 % aus Stärke, aus der Ethanol produziert werden kann. Um 1 m^3 Ethanol herzustellen, werden ungefähr 2,5 t Mais benötigt.

Mais ist als tropische bis subtropische Pflanze nicht frostresistent, die optimale Wachstumstemperatur liegt bei 30°C. Einige Sorten wachsen auch in den gemäßigten Breiten. Die Pflanze ist relativ trockenheitstolerant und wächst auch auf kargeren Böden (Farack, 2007). Der Stickstoffgehalt von Körnermais (Korn und Stroh, 86 % Trockensubstanz TS) liegt bei 2,41 kg N pro t Frischmasse, der mittlere Kornertrag liegt in Deutschland bei 90 t pro ha (LfL Bayern, 2008).
Foto: ©gabriele.moser

der Weltproduktion) und China (knapp 152 Mio. t oder 19 %) (FAOSTAT, 2007). Deutschland lieferte im Jahr 2006 mit knapp 3,4 Mio. t lediglich 0,5 % der Weltproduktion von Körnermais, produzierte dafür knapp 47 Mio. t Futtermais (DESTATIS, 2007).

Der Anteil der Produktionsfläche mit gentechnisch veränderten Maissorten (GV-Mais) lag im Jahr 2007 bei 35,2 Mio. ha (entspricht 24 % der weltweiten Produktionsfläche von Mais). In den USA stammen mittlerweile 80 % der Maisproduktion von GV-Maissorten. (ISAAA, 2008).

Die heutigen Maismonokulturen haben verschiedene negative Umweltwirkungen. Das Grundwasser wird durch Nitratauswaschung beim Einsatz von N-Düngern und mit Herbiziden belastet. Der Boden wird durch lange Brachzeiten gefährdet und durch schwere Landwirtschaftsmaschinen verdichtet und erodiert. Zudem erfordert der Maisanbau nach konventioneller Praxis einen hohen Energieeinsatz (ITADA, 2006). Hinzu kommt, dass Maismonokulturen ein biodiversitätsarmes Agrarökosystem darstellen. Berücksichtigt man die Landnutzungsänderungen zur Produktion von Mais-Ethanol in der THG-Bilanz, verdoppeln sich die THG-Emissionen während 30 Jahren im Vergleich zur fossilen Kraftstoffnutzung (Searchinger et al., 2008).

Verschiedene Maßnahmen können zur Verbesserung der ökologischen Auswirkungen eingesetzt werden. Durch eine Erweiterung der Fruchtfolgen und geeignete Zwischenfrüchte wird der Agrarlebensraum aufgewertet. Um den Boden vor Erosion und Verdichtung zu schützen, dienen Mulchsaatverfahren, eine bessere Bodenbedeckung und eine reduzierte Bodenbearbeitung, wobei letztere – neben einem angepassten Düngeregime – auch den Energieaufwand zu reduzieren hilft (ITADA, 2006).

Raps

Im Jahr 2007 betrug die weltweite Rapsproduktion 49 Mio. t (FAOSTAT, 2007; Kasten 7.1-5). Deutschland lag nach China, Kanada und Indien mit 5,3 Mio. t (knapp 11 %) an vierter Stelle der Weltproduktion. Auf 20 % oder 5,5 Mio. ha der weltweiten Raps-Anbauflächen stehen gentechnisch veränderte Sorten (ISAAA, 2008).

Die Produktionsmenge nahm in den letzten Jahren infolge des Absatzes auf dem Biokraftstoffmarkt stark zu. So wurden 2006 auf 12 % der zur Verfügung stehenden Ackerfläche in Deutschland Raps produziert (inkl. Rübsen; DESTATIS, 2006), allerdings mit großen regionalen Unterschieden. In Mecklenburg-Vorpommern wurde die Ölsaat im Jahr 2007 auf fast 23 % der gesamten Ackerfläche angebaut (Grunert, 2007). Der Grenzwert für eine noch zu tolerierende Anbaufläche wird von Grunert auf 25 % geschätzt, was einer Rotationsfolge mit 3-jähriger Anbaupause entspricht.

Problematisch wirken sich die immer kürzeren Anbaupausen und die zunehmende Nachbarschaft von Rapsfeldern auf den Infektionsdruck durch

Kasten 7.1-5

Raps *(Brassica napus* ssp. *oleifera* L.*)*

Raps stammt ursprünglich aus dem südosteuropäischen Mittelmeerraum und wird wie die nahe Verwandte Rübse *(Brassica rapa* L.) vor allem zur Gewinnung von hochwertigem Öl angebaut. Die Pflanze wächst je nach Sorte bis zu 160 cm hoch und bildet leuchtend gelbe Blütentrauben. Die kleinen, runden Samen in den Schoten haben einen Ölgehalt von 40–50 %. Das Rapsöl war ursprünglich reich an der für einen herb-bitteren Geschmack des Öls verantwortlichen Erucasäure. Durch Züchtungen in den 1980er Jahren konnte der Gehalt an Erucasäure praktisch ganz durch die vom Organismus verträglichere Ölsäure ersetzt werden (sog. Canola = Canadian oil, low acid).

Winterraps wird bereits im Spätsommer ausgesät, der einjährige Sommerraps im Frühjahr. Raps gedeiht überall gut, wo auch Weizen wachsen kann. Winterraps erträgt ohne schützende Schneedecke Frosttemperaturen unter -15°C über mehrere Tage hinweg schlecht. Auch sollte das Klima im Herbst die Etablierung der Jungpflanzen und die Ausbildung der Blattrosette ermöglichen. Staunässe und stark austrocknende Böden sind für den Rapsanbau weniger geeignet.

Zur Gewinnung des Rapsöls werden die Samen gewalzt und gepresst. Der Pressrückstand oder sogenannte Presskuchen ist ein eiweißreiches Tierfutter. Das Rapsöl ist ein

wertvolles Speiseöl und dient u.a. zur Herstellung von Margarinen, wird aber auch als Schmieröl in der Industrie eingesetzt. Der Hauptverwendungsbereich von Raps liegt heute bei der Produktion von Biodiesel (RME = Rapsölmethylester; Lieberei et al., 2007). Der Stickstoffgehalt von Raps (Korn und Stroh, 91 % TS) liegt bei 4,54 kg N pro t Frischmasse, der mittlere Kornertrag liegt in Deutschland bei 30 t pro ha (LfL Bayern, 2008).
Foto: Meinhard Schulz-Baldes, WBGU

Pflanzenkrankheiten und Schädlinge aus, was einen vermehrten Einsatz an Pflanzenschutzmittel erfordert und die Resistenzbildung begünstigt (Grunert, 2007). Raps benötigt zudem sehr viel Stickstoffdünger, der große Umweltbelastungen (hoher Energieverbrauch bei der Herstellung und Nitratbelastung des Grundwassers bei nicht sachgemäßem Ausbringen) verursacht. Dafür profitiert die Folgefrucht von einer guten Bodenstruktur und einer hohen Nährstoffmenge im Boden (Grunert, 2007). Die Nährstoffauswaschung muss jedoch durch die Wahl einer geeigneten Folgefrucht vermieden werden. Konservierende Bodenbearbeitungsverfahren wie Mulchsaat und das Belassen des Strohs auf dem Feld wirken zwar bodenschonend, allerdings begünstigen sie das Überdauern von Krankheitserregern und Schädlingen (Alpmann, 2005).

Getreide

Die Getreide Weizen, Hafer, Gerste und Roggen wurden in den letzten Jahren für die Bioenergieproduktion wegen der steigenden Rohölpreise zunehmend wirtschaftlich interessant (Tuck et al., 2006; Kasten 7.1-6). Aus den stärkehaltigen Getreidekörnern lässt sich Ethanol produzieren und das Stroh eignet sich als Festbrennstoff. Auch der Weizen-Roggen-Hybrid Triticale, der bisher vorwiegend als Tierfutter genutzt wurde, geriet in den letzten Jahren wegen seiner hohen Biomasseerträge und guten Brenneigenschaften in den Fokus der Bioenergieproduzenten (Jorgensen et al., 2007). Weltweit wurden 2007 in 36 Ländern insgesamt 12,6 Mio. t Triticale angebaut. Die drei größten Produzenten waren Polen (4,2 Mio. t), Deutschland (knapp 2,2 Mio. t) und Frankreich (1,5 Mio. t) (FAOSTAT, 2007).

Der Getreideanbau für Energiezwecke ist seit 2001 in der EU allerdings lediglich auf Stilllegungsflächen erlaubt, und dort auch nur, wenn die daraus produzierte Energie auf demselben landwirtschaftlichen Betrieb genutzt wird (EU-Verordnung Nr. 587/2001).

Die Umweltbelastungen von intensivem Getreideanbau gleichen denjenigen der Mais- und Rapsproduktion (Nitrat- und Herbizidbelastung des Bodens und des Grundwassers, hoher Energieverbrauch). Auch die Verwertung von Restbiomasse wie Getreidestroh zur Produktion von Bioenergie ist nicht unumstritten, da dem Boden dadurch zusätzlich Kohlenstoff entzogen wird (Reijnders, 2008; Saffih-Hdadi und Mary, 2008).

7.1.1.3 Mehrjährige Kulturen in den gemäßigten Breiten

Chinaschilf

Das ausdauernde Süßgras Chinaschilf, ursprünglich in Südostasien beheimatet, ist eine potente Pflanze zur Produktion von Biomasse und Fasern (Kasten 7.1-7). Eine Gefahr beim Anbau von Chinaschilf stellt die Auswilderung dar, z. B. durch nicht vollständiges Ausgraben der Wurzeln bei der Entfernung der Pflanze (Kasten 5.4-3). Im Osten der USA figuriert die Pflanze auf der Liste der invasiven Neophyten, die einheimische Pflanzenarten zu verdrängen droht (Swearingen et al., 2002).

Das Sequestrationspotenzial von Chinaschilf-Plantagen liegt bei 5,2–7,2 C pro ha und Jahr (Clifton-Brown et al., 2007). In einer Vergleichsstudie zur Stickstoff-, Energie- und Landnutzungseffizienz

Kasten 7.1-6

Triticale *(Triticum aestivum* L. x *Secale cereale* L.*)*

Seit den 1930er Jahren wird Triticale gezielt gezüchtet. Das hybride Getreide Triticale ist eine Kreuzung aus Weizen und Roggen und verbindet die Eigenschaften von beiden Getreidearten. Roggen ist anspruchsloser als Weizen, was die Standortbedingungen betrifft, und wächst auch in rauerem Klima und auf kargeren Böden. Weizen liefert dagegen höhere Erträge und ein Mehl mit guten Backeigenschaften. Triticale wird zunehmend zur Produktion von Biomasse für Energiezwecke angebaut. Das Getreide eignet sich dazu besonders, da es festsitzende Körner hat, die auch bei einer späten Ernte, wenn die Pflanze nur noch geringe Feuchtigkeit enthält, nicht abfallen (Lewandowski und Schmidt, 2006). Triticale liefert wie Roggen auch bei niedrigerer Stickstoffdüngung mehr Trockenmasse als Weizen und eignet sich deshalb besser für die Produktion von Biomasse für Energiezwecke (Jorgensen et al., 2007). Der Stickstoffgehalt von Triticale (Korn und Stroh, 86 % TS) liegt bei 2,1 kg N pro t Frischmasse, der mittlere Kornertrag liegt in Deutschland bei 6,0 t pro ha (LfL Bayern, 2008).

Foto: Klaus Münchhoff, Gut Drerenburg

Kasten 7.1-7

Chinaschilf *(Miscanthus sinensis* Anderss.)

Bereits nach drei Jahren erreicht Chinaschilf eine Wuchshöhe von über 4 m. Das schnelle Wachstum verdankt das Gras – wie z.B. auch Mais und Zuckerrohr – dem C4-Photosynthesemechanismus, der eine schnellere Photosynthese bei mehr Wärme und Licht ermöglicht und Wasser und CO_2 effizienter nutzt als der C3-Mechanismus. Zur Biomassegewinnung wird der Artbastard *Miscanthus x giganteus* angebaut. Chinaschilf ist eine Wärme liebende Pflanze, die unter optimalen Bedingungen bis über 20 Jahre lang Biomasse produzieren kann. Allerdings ist die Pflanze in der Wachstumsphase sehr kälteempfindlich, Spätfröste können zum Totalausfall der Ernte führen. In Mitteleuropa bildet die Pflanze keine keimfähigen Samen sondern vermehrt sich durch Rhizome (Stolzenburg, 2007). Der Stickstoffgehalt von *Miscanthus* (Ganzpflanze, 80 % TS) liegt bei 0,15 kg N pro t Frischmasse, der mittlere Ertrag liegt in Deutschland bei 22,0 t pro ha (LfL Bayern, 2008).
Foto: © Markus Hagenlocher (Gnu Free Documentation License)

Kasten 7.1-8

Rutenhirse *(Panicum virgatum* L.*)*

Das natürliche Verbreitungsgebiet der Rutenhirse (engl. switchgrass) sind die nordamerikanischen Prärien. Das Präriegras ist eine mehrjährige, rhizombildende Pflanze (das Rhizom ist ein ausdauerndes, unterirdisch oder dicht unter der Bodenoberfläche wachsendes Sprossachsensystem), die eine Wuchshöhe von bis zu 3 m und eine ebenso tiefes Wurzelwachstum erreicht und relativ winterhart ist. Wie Chinaschilf zählt die Rutenhirse zu den Pflanzen mit C4-Photosynthesemechanismus. Die Nutzungsdauer der Pflanzen liegt bei 15–20 Jahren, wobei einmal (bei entsprechender Düngung zweimal) jährlich geschnitten wird. Volle Erträge werden ca. ab dem 3. Jahr erzielt. Der jährliche Stickstoffentzug durch die Ernte bewegt sich – je nach Standort und Erntehäufigkeit – bei 48–276 kg N pro ha. Die maximalen Ernteerträge reichen bis 36,7 t Trockenmasse pro ha und Jahr (Parrish und Fike, 2005). Für Deutschland werden maximale Erträge von 10–17 t Trockenmasse pro ha und Jahr angegeben (TFZ, 2008).
Foto: Michael Hassler, Bruchsal

der drei Energiepflanzen Triticale (x *Triticosecale*), Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea* L.*)* und Chinaschilf schnitt letzteres deutlich am besten ab (Lewandowski und Schmidt, 2006). Um einen optimalen Umgang mit den Ressourcen zu gewährleisten, empfehlen die Autoren dieser Studie, bei der Produktion von Biomasse Chinaschilf anzubauen, und wo es klimatisch dafür zu kühl ist, zu Kurzumtriebsplantagen mit Gehölzen.

Rutenhirse

Das Präriegras Rutenhirse gewinnt neben seiner traditionellen Verwendung als hochwertiges Viehfutter auch in der Bioenergieproduktion zunehmend an Bedeutung (Kasten 7.1-8). Positive Umweltauswirkungen des Rutenhirseanbaus liegen in der Erosionsverminderung durch Windabschirmung, eine ganzjährige Bodenbedeckung und einer guten Durchwurzelung des Bodens. Auch bieten Rutenhirsebestände in den USA Unterschlupf und Futter für verschiedene Vögel und Kleintiere (USDA, 2001). Der SRU (2007) beurteilt in seinem Gutachten zum Thema Klimaschutz und Biomasse Rutenhirsemonokulturen allerdings als mittleres Risiko für die Biodiversität.

In einer Lebenszyklusanalyse von Adler et al. (2007) zu Treibhausgasflüssen beim Anbau von Bioenergiepflanzen lag die THG-Reduktion der Rutenhirse gegenüber fossilen Treibstoffen über einen Zeitraum von 30 Jahren bei durchschnittlich 115 % (100 % THG-Reduktion plus 15 % Kohlenstoffsequestrierung im Boden). Gegenüber einem Mais-Soja-Rotationsanbausystem weist Rutenhirse ein größeres Kohlenstoffsequestrierungspotenzial auf (Al-Kaisi und Grote, 2007).

Kasten 7.1-9

Algen als Lieferanten von Bioenergie

ALGEN ZUR WASSERSTOFFPRODUKTION
Die einzellige Algenart *Chlamydomonas reinhardtii* hat die Eigenschaft, dass ihre Photosynthese unter Stressbedingungen als Nebenprodukt Wasserstoff erzeugt (Hydrogenese). Da dabei keine Treibhausgase freigesetzt werden, kann die Algenart zur klimaneutralen Produktion von nutzbarer Energie verwendet werden. In Laborversuchen wurde ermittelt, dass die Algen vor allem bei einem vorübergehenden Entzug des Spurenelements Schwefel Wasserstoff produzieren. Des Weiteren gelang es mit Hilfe gentechnischer Veränderungen, die Wasserstoffproduktion deutlich zu erhöhen, so dass bei der Umwandlung von Sonnenlicht in Wasserstoff der Wirkungsgrad von 0,1 auf 2,5 % gesteigert werden konnte.

Trotz dieser Fortschritte sind einige hemmende Faktoren noch nicht überwunden: Die Algen müssen weiterhin unter Stressbedingungen gehalten werden, um Wasserstoff zu erzeugen. Längere Stresssituationen können allerdings massive Schädigungen der Organismen hervorrufen, weshalb periodische Regenerationsphasen ermöglicht werden müssen, in denen kein Wasserstoff produziert wird. Des Weiteren benötigen die Algen sehr viel Sonnenlicht, so dass jeweils nur in einer sehr dünnen Oberflächenschicht einer mit *Chlamydomonas* durchsetzen wässrigen Lösung Wasserstoff produziert wird. Trotz Versuche, die Algen auf lichtleitenden Fasern zu kultivieren, würden für die industrielle Nutzung – analog zur Photovoltaik – sehr große Flächen benötigt.

Weitere Forschungsansätze zielen darauf ab, die Enzyme zur Hydrogenese aus der Algenart zu isolieren, so dass unabhängig von lebenden Zellkulturen Wasserstoff erzeugt werden kann. Dieser Ansatz befindet sich aber noch in der Entwicklungsphase und ist noch weit von Pilotanwendungen entfernt (Melis und Happe, 2001).

BIOMASSE- UND DIESELPRODUKTION AUS ABGASEN
Getrocknete Algenbiomasse kann grundsätzlich zu Biodiesel, Bioethanol oder Biogas umgewandelt werden. Der Ölanteil von verschiedenern Algenarten erreicht bis zu 40–50 Gewichtsprozente, was sie zu potenten Biodieselliefer anten macht (FAO, 2007c). Im kürzlich gestarteten Pilotprojekt „Technologien zur Erschließung der Ressource Mikroalgen“ (TERM) in Hamburg werden Abgase aus einem Blockheizkraftwerk in ein Wasserbecken mit Algenkulturen geleitet. Die Algen können ein Teil des CO_2 aufnehmen und in Biomasse umwandeln. Laut Angaben des Projektes können in solchen Algenbädern pro ha und Jahr bis zu 450 t CO_2 sequestriert werden, was einer Biomassemenge von etwa 150 t entspricht. Damit wäre die Flächenproduktivität um den Faktor 10 höher als bei der landwirtschaftlichen Biomasseproduktion. Im Pilotprojekt ist geplant, die Algen in Biodiesel umzuwandeln und wieder energetisch zu nutzen. Somit ergäbe sich zwar kein direkter Senkeneffekt, im Gesamtsystem würde sich das emittierte CO_2 aber auf zwei Energieprodukte verteilen, wodurch die Treibhausgasintensität pro Energieeinheit sinken würde.

In Hinblick auf eine großindustrielle Anwendung erscheint das Konzept aber nur von begrenzter Anwendbarkeit: Um die CO_2-Emissionen eines Steinkohlekraftwerks mit einer Leistung von 800 MW zu sequestrieren, müsst in der Nachbarschaft der Anlage ein Algenbad mit 100 km² Fläche bereitgestellt werden. Vorteile könnte das System allerdings auf versiegelten und kontaminierten Flächen (Industriebrachen) entfalten, die kaum anderweitig genutzt werden können. Hier erscheint eine Koppelung mit kleineren Anlagen durchaus vielversprechend. Bis jetzt wurde allerdings noch kein Nachweis erbracht, dass eine großskalige Algenproduktion mit der dazu benötigten aufwändigen Infrastruktur und die anschließende Aufbereitung des Treibstoffs insgesamt eine positive CO_2-Bilanz aufweist (Ullrich, 2008). Auch die Produktion von Biodiesel aus Algen gestaltet sich heute noch sehr kostenintensiv (Ackermann, 2007; FAO, 2007c).

7.1.2 Kurzumtriebsplantagen

Bei einer Kurzumtriebsplantage (KUP) steht die stoffliche und energetische Nutzung des Holzes im Vordergrund. Dazu werden schnellwüchsige Arten – z. B. Pappel und Weide in den gemäßigten und Eukalyptus oder *Pinus radiata* in den subtropischen und tropischen Breiten – angebaut. In tropischen Böden sind der Nährstoffverlust und die Belastung des lokalen Wasserhaushalts bereits nach wenigen Umtriebszeiten sehr groß. Zudem kann der Streufall einzelner Eukalyptusarten phytotoxisch wirken und somit einen erosionsverhindernden Unterwuchs unterdrücken (Poore und Fries, 1985). Allgemeine Vor- und Nachteile von KUPs sind in Tabelle 7.1-2 dargestellt. Die Baumpflanzungen erfolgen auf landwirtschaftlichen Flächen und unterstehen in Europa rechtlich der landwirtschaftlichen Gesetzgebung und nicht dem Waldgesetz, d. h. es bestehen keine gesetzlichen Einschränkungen bezüglich Kahlschlag und Rodungen.

KUPs eignen sich für die Bepflanzung von stillgelegten Flächen (Brachen, Altlastenböden). In Deutschland wird für die Anlage auf einer stillgelegten Fläche im Rahmen des Anbaus für nachwachsende Rohstoffe Beihilfe erstattet. Das Holz kann sowohl stofflich als auch energetisch verwertet werden.

Falls intensiv genutztes Grünland umgebrochen wird, um Energiepflanzen anzubauen, sind in Deutschland Pappel-KUPs zur Gewinnung von Hackschnitzeln nachhaltiger als der Maisanbau für die Ethanolproduktion, wie eine Studie des Forschungszentrums Karlsruhe aufzeigt (Rösch et al., 2007). Der Umbruch von Grasland zur Produktion von Biomasse für Energiezwecke sollte allerdings vermieden werden (EU-Kommission, 2005d). Der SRU fordert in seinem Sondergutachten zu Biomasse und Klimaschutz ein generelles Verbot für die Umwandlung von Grünland zur Gewinnung von Biomasse (SRU, 2007).

Grundsätzlich ist die biologische Vielfalt in natürlichen Wäldern reicher als in Baumpflanzungen (Rai-

Tabelle 7.1-2
Vor- und Nachteile von Kurzumtriebsplantagen.
Quelle: WBGU

Vorteile			
Wirtschaftlichkeit	**Bodenqualität**	**CO_2-Bilanz**	**Ökosystemleistungen**
Hohe Biomasseproduktion auf kleiner Fläche	Erosionsschutz durch ganzjährige Vegetationsdecke	„Klimaneutraler" Rohstoff (außer Düngungsverluste, Emissionen bei Ernte)	Verbesserung des Lokalklimas (Windschutz, Dämpfung von Temperaturextremen)
Relativ schnelle Amortisierung des eingesetzten Kapitals	Lockerung des Oberbodens durch dichtes Wurzelwerk	Kohlenstoffspeicherung im Boden. Aber: abhängig von Zeitdauer	Lebensraum für Tiere (Nistplätze, Futter usw.), Mischkultur-KUPs als „Brückenpfeiler" in Biotopverbundsystemen
Einfache Planung und Kalkulation	ungestörte Entwicklung der Bodenfauna		Hochwasserrückhaltung
Sicherstellung der Rohstoffversorgung	keine Bodenverdichtung durch reduziertes Befahren der Fläche		Grünfläche als ästhetisches Landschaftsbild
Gleichmäßiger Rohstoffanfall	Je nach Baumart: Entgiftung schwermetallbelasteter Böden		Luft- und Wasserfilterung, O_2-Produktion
Nachteile			
Wirtschaftlichkeit	**Bodenqualität**	**CO_2-Bilanz**	**Ökosystemleistungen**
Düngung/Bewässerung erforderlich, je nach Standort und Baumart	Je kürzer die Umtriebszeit, umso stärker fallen Bodenbelastung, Nährstoffbedarf, Pestizideinsatz usw. ökologisch negativ ins Gewicht	THG-Emissionen abhängig von der Gesamtökobilanz (Bewirtschaftungsart, Rotationsdauer usw.)	Landnutzungskonkurrenz zu Nahrungsmittelanbau
Entwicklung des Marktpreises für Holzbiomasse als Risiko			Belastung des Gebietswasserhaushaltes (bei großen Plantagen Tangierung der Trinkwasserversorgung und des Biotopschutzes)
Zusätzlich forstwirtschaftlicher Maschinenpark			Bedrohung der Agrarökosysteme durch großflächige Plantagen

son, 2005). Das Pflanzen von KUPs als räumliche und zeitliche Mischkulturen kann dennoch helfen, vielfältigere landschaftliche Strukturen zu schaffen. Eine Gründüngung oder Mulch zwischen den Baumreihen dient nicht nur als Nährstofflieferant und ersetzt Mineraldünger, sondern bietet auch Nischen für Kleinlebewesen.

7.1.3 Waldfeldbau

Der Waldfeldbau oder die Agrarforstwirtschaft (engl. agroforestry) ist eine Kombination aus Land- und Forstwirtschaft auf einer gemeinsamen Fläche (z.B. Baumreihenkulturen, Ertragshecken usw.). Neben mehrjährigen Bäumen oder Sträuchern werden einjährige Ackerkulturen angebaut. Werden auf derselben Fläche auch noch Tiere gehalten, spricht man von einem agrosilvopastoralen System. Agrarforstwirtschaftliche Systeme sind vor allem bei Kleinbauern in den Tropen verbreitet. Sie dienen in erster Linie der Nahrungsmittelproduktion. Es ist deshalb schwer abschätzbar, wie viel Biomasse für die Energienutzung in diesen tropischen Systemen insgesamt produziert werden könnte. Der Anbau von Bioenergiepflanzen (z.B. Ölpalmen) in Mischkultur kann eine sinnvolle Maßnahme einer Nachhaltigkeitsstrategie für kleinbäuerliche Betriebe darstellen.

Waldfeldbau bietet gegenüber reinem Ackerfeldbau einige Vorteile (Tab. 5.1-3). Die Mischkultur mit Bäumen bietet verschiedene ökologische Nischen auf kleinen Raum und fördert die Vielfalt der Kulturlandschaft. Durch die ganzjährige Bodenbedeckung und die dichte und tiefere Durchwurzelung des Bodens ist dieser außerdem besser vor Erosion

Kasten 7.1-10

Kurzumtriebsplantagen (KUPs)

Als Kurzumtriebsplantage (KUP, engl. short-rotation forestry oder *short-rotation coppice*) wird der Anbau von raschwüchsigen Baumarten zur Produktion von Biomasse auf Agrarflächen bezeichnet. KUPs haben ihren Ursprung in der Niederwaldwirtschaft, die früher zur Bereitstellung von Brennholz diente. Die Umtriebszeit beschreibt die Wachstumszeit, bis die Bäume geschlagen werden, und ist abhängig von der Nutzung des Holzes. Für Faserholz respektive zur Hackschnitzelgewinnung werden die Bäume nach 3–5 Jahren geschlagen, für Industrieholz nach ca. 20 Jahren und für Stammholz nach bis zu 30 Jahren.

Geeignete Baumarten für KUPs müssen neben der Schnellwüchsigkeit auch andere Eigenschaften aufweisen, z. B. das Ertragen von extremem Dichtstand, Schmalkronigkeit, günstiges Verhältnis zwischen Wasser- und Nährstoffverbrauch sowie Holzproduktion, gute Stockausschlagfähigkeit nach der Ernte und Widerstandsfähigkeit gegen biotische und abiotische Schädigungen.

Häufig angepflanzte Baumarten in den gemäßigten Breiten sind Weiden *(Salix* sp.) und Pappeln *(Populus* sp.) und deren Hybride, da sie unter durchschnittlicher Nährstoffverfügbarkeit und gutem Wasserhaushalt im Boden einen sehr raschen Wuchs aufweisen. Zitterpappeln (Populus tremula) sind relativ trockenheitstolerant und eignen sich auch auf exponierten Standorten (z. B. Kuppen), während Weiden auf feuchten Standorten gedeihen. Auf sehr trockenen und nährstoffarmen Böden bieten sich Birken *(Betula* sp.) und auf nassen Standorten Erlen *(Alnus* sp.) zur Pflanzung an (Röhricht und Ruscher, 2004; LWF, 2005). In den Subtropen und Tropen sind Eukalyptuspflanzungen verbreitet.

Die Stickstoffentzüge von KUPs liegen bei einem mittleren Ertragsniveau für Pappeln bei 64 kg N pro ha bei einem Ertrag von 10 t Trockenmasse pro ha und Jahr und für Weiden bei 32 kg N pro ha bei einem Ertrag von 7 t Trockenmasse pro ha und Jahr (KTBL, 2006).

Foto: CLAAS Harsewinkel

geschützt, die Nährstoffauswaschung aus dem Boden wird verringert, die Nährstoffverfügbarkeit verbessert. Nachteilig können sich für die Produzenten die verhältnismäßig kleinen Mengen der Produkte bei der Vermarktung auswirken. Zudem erfordern Waldfeldbausysteme eine längerfristige Planung und sind erst nach einer gewissen Zeit rentabel.

Das europäische SAFE Projekt (Silvoarable Forestry for Europe, 2001–2005) untersuchte den Ertragsnutzen von Waldfeldbau in verschiedenen Versuchen und mehreren europäischen Ländern. Es konnte gezeigt werden, dass in Mischkulturen gegenüber Monokulturen die zur Verfügung stehenden Nährstoffe besser genutzt werden (Dupraz et al., 2005). Laut Reisner et al. (2007) könnten auf 56 % der europäischen Ackerfläche die europäischen Baumarten Pappel, Steineiche, Pinie, Nussbaum und Kirsche zusammen mit den üblichen Ackerkulturen kombiniert profitabel angebaut werden. Dies könnte auf ca. 40 % der europäischen Ackerfläche auch die Nitratauswaschung mindern, den Boden vor Erosion schützen und die Biodiversität der Landschaft fördern (Reisner et al., 2007).

Agrarforstsysteme sind in Deutschland heute noch wenig verbreitet. Im Rahmen des Agroforst-Forschungsverbundes hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung das Forschungszentrum Jülich beauftragt, agrarforstliche Bewirtschaftungskonzepte unter ökonomischen, ökologischen und sozialen Kriterien zu untersuchen, vor allem auch im Hinblick auf eine mögliche Alternative zu der konventionellen räumlichen Trennung von Land- und Forstwirtschaft und zur Förderung einer nachhaltigen Entwicklung. Das Projekt läuft von 2005–2008. Ein Projektschwerpunkt ist die Erzeugung von Holzbiomasse.

7.1.4 Dauergrasland und Weiden

Durch abnehmende Tierbestände (u. a. durch Strukturwandel in der Milchviehhaltung) entstehen in Deutschland zunehmend Graslandüberschüsse. In einer Studie des Forschungszentrums Karlsruhe wurde deshalb untersucht, wie Grasland in Baden-Württemberg als Alternative zur Milchviehhaltung oder zur reinen Grünlandpflege auch zur Gewinnung von Bioenergieträgern genutzt werden kann (Rösch et al., 2007). Gebräuchlich sind bisher die Herstellung von Biogas aus Grassilage (Fermentation) und die thermische Verwertung von Heu. Die Vergasung von Grasschnitt steckt gegenwärtig noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium (Kap. 7.2). Bei extensiver Graslandbewirtschaftung ist die Nutzung von Heu als Brennstoff laut der Studie von Rösch

Tabelle 7.1-3
Vor- und Nachteile des Waldfeldbaus.
Quelle: WBGU

Vorteile			
Wirtschaftlichkeit	**Bodenqualität**	**CO_2-Bilanz**	**Ökosystemleistungen**
Diversifizierung	Ganzjährige Bodenbedeckung schützt vor Erosion	Durch Bodenbedeckung weniger C-Emissionen als bei Monokulturen	Größere Krankheits- und Schädlingsresistenz dank Mischkultur
Selbstversorgung, unabhängig von großen Märkten und Agrarindustrie	Mischkultur beugt einseitiger Nährstoffzehrung vor	Dichtes und tiefes Wurzelwerk der Bäume sequestriert C	Vielfältigerer Lebensraum als Monokultur
			Schaffung von geeignetem Mikroklima für bestimmte Ackerkulturen (Schatten, Windschutz, Wasserspeicher)
Nachteile			
Wirtschaftlichkeit	**Bodenqualität**	**CO_2-Bilanz**	**Ökosystemleistungen**
Langfristige Planung, erst nach gewisser Zeit rentabel			Je nach Wurzeleigenschaften direkte Konkurrenz der Bäume mit der Unterfrucht um Nährstoffe und Wasser
Kleine Erntemengen erschweren Marktzugang			
Arbeitsintensiver, da keine großen Landwirtschaftsmaschinen einsetzbar			

et al. (2007) in den Kategorien Energieeinsparung, Klimaschutz, Einkommen und Beschäftigung nachhaltiger als die reine Grünlandpflege. Dafür entstehen aber durch die thermische Nutzung Emissionen, die die Gesundheit und Umwelt belasten, auch wenn solche zusätzlichen Belastungen mit fortschrittlicher Technologie in Zukunft vermindert werden können. Demgegenüber fällt bei der Stromgewinnung durch Grassilage die Freisetzung von Methan negativ ins Gewicht, während die Auswirkungen auf ökologische und sozioökonomische Indikatoren positiv sind (Rösch et al., 2007).

Ein weiterer interessanter Aspekt bei der extensiven Graslandnutzung ist der Erhalt bzw. die Förderung der biologischen Vielfalt. Ergebnisse aus einem großen Biodiversitätsexperiment in Deutschland (The Jena Experiment) belegen eindrücklich, dass Grasland mit höherer Biodiversität höhere Ökosystemleistungen (z.B. Produktivität, Kohlenstoffspeicherung, Nährstoffnutzung usw.) leisten kann als artenarme Systeme (Oelmann et al., 2007; Weigelt et al., 2008). Selbst die Futterqualität und die Brennwerte stiegen mit zunehmender Biodiversität an (pers. Mitteilung Dr. Michael Scherer-Lorenzen, ETH Zürich, und Prof. Dr. Michael Wachendorf, Universität Kassel). Ähnliche Ergebnisse liegen auch für nordamerikanische Prärie vor. Nach einer Studie von Tilman et al. (2006) produzierte Prärie mit hoher Biodiversität sogar mehr Bioenergie pro Fläche als Ethanol aus Mais oder Biodiesel aus Soja, und dies bei kleineren THG-Emissionen und einer geringeren Belastung des Bodens durch Agrochemikalien. Gemäß dieser Studie stehen weltweit $5x10^8$ ha erodierte, marginale Landfläche zur Verfügung, die sich für den Anbau von solchem Low-Intensity-High-Diversity Grasland eignet. Wenn auch die Größe der global zur Verfügung stehenden marginalen Flächen und deren Produktivität noch diskutiert wird (Russelle et al, 2007; Tilman et al, 2007), so bergen diese neuen Ansätze zur nachhaltigen Produktion von Biomasse große Potenziale zur ökologischen Aufwertung degradierter Gebiete. Auf solchen degradierten Landflächen bietet sich außerdem die Möglichkeit, dass infolge einer neuen Vegetationsdecke und dem damit verbundenen organischen Eintrag in den Boden, dieser nachhaltig restauriert und somit langfristig für die Nahrungsmittelproduktion oder für die stoffliche Nutzung verfügbar gemacht werden kann.

Eine Ökobilanzstudie der Schweizerischen Bundesämter für Energie, Umwelt und Landwirtschaft bilanzierte die Auswirkungen des Ressourcen-, Schadstoff- und Nährstoffmanagements landwirtschaftlicher Biomasseproduktion auf die THG-Emissionen und ökologische Nachhaltigkeit (Kägi et al., 2007). Extensive Wiesen produzieren gemäß dieser Studie durchschnittlich 2.7 t Trockensubstanz (TS) pro ha,

biologisch bewirtschaftete Dauerwiesen 9,9 t TS pro ha und Dauerwiesen mit Bewirtschaftung nach integrierter Produktion 11,7 t TS pro ha. Integrierte Produktion (IP) ist eine Anbaumethode mit möglichst geringen Umweltauswirkungen, aber bei weniger strikten Anforderungen als bei der kontrollierten biologischen Produktion. Für die Bioenergieproduktion durch Gras ist gemäß dieser Studie die intensivere IP-Bewirtschaftung vorzuziehen, da diese nicht nur 10–15 % mehr Ertrag erbringt als der Biolandbau, sondern auch nur geringe Unterschiede in den Umweltwirkungen feststellbar sind. Der Umrechnungsfaktor der Ethanolausbeute für Gras (Stärkeäquivalentwerte) wird mit 0,24 kg pro kg TS angegeben. Extensiv bewirtschaftete Wiesen haben pro kg TS insgesamt geringere Umweltlasten als intensiv bewirtschaftete. Aber sowohl intensiv als auch extensiv bewirtschaftete Wiesen erbringen pro Produkteinheit bessere Ergebnisse bezüglich Umweltlast und Ertragsverlust als eine mittlere Bewirtschaftungsintensität (Kägi et al., 2007). Bei extensivem Anbau von Gras ergeben sich gemäß der Ökobilanzstudie zu Energieprodukten der EMPA (Zah et al., 2007) weniger THG-Emissionen als bei der intensiven Bewirtschaftung, dafür nimmt die Biomasseproduktion und Ethanolausbeute ab, sodass in der Studie keine eigentlich bevorzugte Anbaumethode empfohlen wird.

Im sogenannten DOK-Versuch, einem Langzeitexperiment des Forschungsinstituts für biologischen Landbau FibL in der Schweiz, wurden seit den 1970er Jahren unterschiedliche Anbausysteme (biologisch, biologisch-dynamisch, konventionell also entsprechend derintegrierten Produktion) und verschiedene Düngerformen (Hofdünger, Hof- und Mineraldünger, Mineraldünger) und -intensitäten miteinander verglichen (FiBL, 2001; Maeder et al., 2002). Die Erträge der Kunstwiesen (d.h. Wiesen in der Ackerrotation) waren bei der ökologischen Bewirtschaftung in den ersten zwei Rotationsfolgen (je 7 Jahre) nur um 11–13 % geringer als beim konventionellen Anbau. Die Ertragsunterschiede vergrößerten sich geringfügig in der dritten Fruchtfolgeperiode (FiBL, 2001). Grundsätzlich ist im ökologischen Landbau ohne Mineraldüngereinsatz und ohne chemisch-synthetischem Pflanzenschutz mit einer Ertragseinbuße von ca. 20 % zu rechnen (FiBL, 2001; Maeder et al., 2002). Der Dünger- und Energieeinsatz reduziert sich dafür gegenüber dem konventionellen Anbau um 34 % resp. 53 % und der Pestizideinsatz um 97 % (Maeder et al. 2002).

Die Kohlenstoffaufnahme in temperatem Grasland kann durch Stickstoffdüngung beeinflusst werden (Soussana et al., 2004). Eine moderate Stickstoffzugabe fördert die Kohlenstoffaufnahme des Bodens, während durch eine zu hohe Stickstoffdüngung die Mineralisation von organischem Kohlenstoff angeregt wird (Soussana et al., 2004). Um also möglichst viel Kohlenstoff in Grasböden zu speichern, empfehlen die Autoren auf stark gedüngten Grasflächen den Nährstoffinput zu reduzieren und auf extensiv bewirtschafteten Grasländern moderat zu düngen (Soussana et al., 2004). Ausgeschlossen von dieser Empfehlung sind Berg- und Feuchtwiesen, die schon natürlicherweise große Kohlenstoffspeicher aufweisen.

7.1.5 Wälder als Biomasselieferanten

7.1.5.1 Biomassenutzung in tropischen Wäldern

Der Anteil der tropischen Wälder an der globalen Waldfläche liegt nach Schätzungen der FAO bei 42 % (Hakkila und Parikka, 2002). Weltweit wurden im Jahr 2005 insgesamt ungefähr 2,8 Mrd. m^3 Holz aus Wäldern genutzt (FAO, 2006c). Der Anteil der direkten Holzverwertung als Brennholz (v.a. durch Entwicklungsländer) liegt global gemittelt bei ungefähr 40 % (Afrika 88 %, Nord- und Zentralamerika 13 %), der Rest wird industriell verarbeitet (FAO, 2006c). Illegale Holzentnahmen und das Sammeln von Feuerholz durch Privatpersonen fließen nur insoweit in die Resultate der FAO-Waldstatistik ein, als Zahlen von einzelnen Nationen dazu vorliegen (FAO, 2006c).

Die Ausweitung des Straßennetzes in Tropenwaldgebieten führt mittelfristig fast unweigerlich zur Entwaldung (Asner et al., 2006; Fearnside, 2008). Regenwald im brasilianischen Amazonasgebiet mit einem Abstand von weniger als 25 km zu einer Straße unterliegt einem viermal größeren Risiko, abgeholzt zu werden als Waldflächen außerhalb dieses Radius (Asner et al., 2006). Unangemessene selektive Holzernten, unerlaubter Holzeinschlag und anthropogen verursachte Feuer greifen weiter negativ in die Kohlenstoffbilanz der tropischen Wälder ein und bedrängen die biologische Vielfalt (z.B. WBGU, 1998; Cochrane, 2003; Nepstad et al., 2008; Fearnside, 2008). Nach dem Holzeinschlag nimmt nicht nur der Artenreichtum der nachwachsenden Pflanzen ab, auch invasive Arten breiten sich viel schneller aus als im naturbelassenen Wald (Baret et al., 2007). Weiter zeigte eine statistische Studie zu den Vogelpopulationen in genutzten und ungenutzten bolivianischen Waldflächen, dass 40 % der Vogelarten, die in den ungenutzten Waldflächen lebten, schutzbedürftig sind. In den genutzten Waldflächen hingegen gehörte die Mehrheit der Vogelpopulationen zu

Arten, die nicht empfindlich auf menschliche Störungen reagieren (Felton et al., 2008).

Im Gegensatz zum Kahlschlag, der vor allem zur Gewinnung von neuer Landwirtschafts- und Weidefläche erfolgt, wird für die Gewinnung von Holz häufig selektiv gefällt. Aber auch wenn dabei „nur" einzelne Bäume geerntet werden und ein großer Teil des Waldes – wenn auch in einem stark beschädigten Zustand – bestehen bleibt, verursacht die selektive Holzgewinnung dennoch in Abhängigkeit der Baumart eine genetische Verarmung der Population (Farwig et al., 2007; de Lacerda et al., 2008) und leistet der Abholzung Vorschub (Asner et al., 2006; Tab. 7.1-4). Knapp ein Drittel der Waldflächen mit nur selektiver Holzgewinnung fielen nach durchschnittlich vier Jahren dem Kahlschlag zum Opfer (Asner et al., 2006). Zudem führt der reduzierte Kronenschluss nach der selektiven Holzgewinnung zu einer Schwächung des Ökosystems (Alongi et al., 2008). Pereira et al. (2002) maßen im Brasilianischen Amazonasgebiet die Lücken im Kronenschluss der Bäume. Während sie im ungestörten Wald bei 3,1 % lagen, waren sie bei der selektiven Holzgewinnung über 20 % und beim nachhaltigeren reduced-impact logging (RIL) immerhin rund 10 %, was sich auf das Mikroklima und den Boden auswirkt (Pereira et al., 2002). Ein lückenhaftes Kronendach führt zu größerem Wasserstress während Trockenperioden und erhöht, zusammen mit zurückgelassenem, dürrem Schlagabraum die Waldbrandgefahr (Cochrane, 2003; Asner et al., 2006). Regenwaldökosysteme der Feuchttropen reagieren dabei viel empfindlicher auf Feuer als Trockenwaldökosysteme, da die Pflanzen nicht an Feuerereignisse angepasst sind (Cochrane, 2003; Nepstad et al., 2008). Die Feuerempfindlichkeit eines selektiv genutzten Waldes kann dabei noch über Jahrzehnte andauern (Cochrane, 2003).

Bei der Holzgewinnung nach der RIL-Methode dienen verschiedene Maßnahmen einer möglichst nachhaltigen Bewirtschaftung: Dazu gehört Erhaltung der Waldsubstanz (nur der Zuwachs wird abgeerntet), das Erstellen von Bauminventaren, eine exakte Planung der Zufahrtswege, um möglichst wenig umliegende Vegetation zu schädigen, ein Netzwerk definierter no-go areas, die als biologische Korridore dienen, und das Erhalten von erntereifen Bäumen als Samenträger. Trotz dieser Maßnahmen kann RIL zu einer Veränderung des Genpools und der räumlichen genetischen Struktur der Population einer Baumart führen, was die Gefahr von Inzucht fördert (de Lacerda et al., 2008). Nicht alle Baumarten scheinen jedoch genetisch gleich empfindlich auf die Nutzung ihrer Population zu reagieren (Borges Silva et al., 2008). Castro-Arellano et al. (2007) maßen die Auswirkungen von RIL auf die Fledermauspopulationen im Amazonasgebiet. Die Verän-

Tabelle 7.1-4
Vor- und Nachteile von *reduced-impact logging* im tropischen Regenwald.
Quelle: WBGU

Vorteile			
Wirtschaftlichkeit	**Bodenqualität**	**CO_2-Bilanz**	**Ökosystemleistungen**
Langfristige wirtschaftliche Nutzung möglich dank Nachhaltigkeit	Wenig Bodenverdichtung durch sorgfältig geplante Ernteeingriffe	Auf Biomasse-Ebene neutral, da nur Waldzuwachs abgeerntet wird	No-go Areas schützen Biodiversität
			Frühzeitiges Erkennen von Ökosystemveränderungen durch intensives Monitoring
Nachteile			
Wirtschaftlichkeit	**Bodenqualität**	**CO_2-Bilanz**	**Ökosystemleistungen**
Hoher Managementaufwand (Raumplanung, Bauminventare)	Reduzierter Kronenschluss beeinflusst Bodenfeuchtigkeit		Trockenheitsresistenz nimmt ab, Waldbrandgefahr wird erhöht
			Risiko für Entwaldung nimmt durch Erschließung zu
			Anzeichen von genetischer Verarmung bei geernteten Bäumen , langfristige Auswirkungen auf Biodiversiät unbekannt
			Schleichende Veränderung des lokalen Mikroklimas

Kasten 7.1-11

Potenziale und Risiken Grüner Gentechnik

Im Rahmen der Diskussion über die Nutzung von Biomasse für Energiezwecke stellt sich die Frage, welchen Beitrag gentechnische Methoden leisten können, um die Potenziale der Bioenergienutzung zu vergrößern, und welche Risiken hiermit verbunden sind. Vor dem Hintergrund einer aus verschiedenen Gründen zunehmenden Verknappung von ertragreichen, landwirtschaftlichen Produktionsflächen wurde bereits in den 1990er Jahren vielfach auf die Relevanz zukünftiger Entwicklungen in der „Grünen Gentechnik" hingewiesen (WBGU, 1998). Vor allem im Hinblick auf die Frage der Nutzung marginaler Standorte zur Bioenergieproduktion wird immer wieder die theoretische Option des Anbaus gentechnisch veränderter, stresstoleranter Nutzpflanzen genannt.

Überblick über Möglichkeiten/Ansatzpunkte der Grünen Gentechnik zur Verbesserung der Potenziale der Bioenergienutzung:

- Ertragssteigerung im engeren Sinne, bedingt durch eine gentechnisch hervorgerufene Steigerung der Biomasseproduktion der Pflanze
- Ertragssteigerung im weiteren Sinne / Ertragssicherung durch eine Minimierung von Ernteverlusten (z.B. durch eine gentechnische bedingte Resistenz gegen Schadinsekten)
- Veränderungen der Inhaltsstoffe der Pflanze im Hinblick auf eine höhere Ausbeute an Biokraftstoffen (z.B. durch gentechnisch bedingten höheren Stärkegehalt der Pflanze oder durch eine gentechnisch bedingte Produktion von Enzymen in der Pflanze, die die Umwandlung des Stärkegehaltes der Pflanze in Ethanol erleichtern)
- Entwicklung von stresstoleranten Pflanzen (z.B. salz- oder dürretolerante Pflanzen) zum Anbau auf Extremstandorten, die bislang nicht für die landwirtschaftliche Produktion genutzt werden können.

In der öffentlichen Debatte wie auch in der Wissenschaft werden die Möglichkeiten der Ertragssteigerungen sehr kontrovers diskutiert. Eine realistische quantitative Einschätzung der tatsächlichen Optimierungspotenziale der genannten Optionen ist derzeit jedoch nicht möglich, da hierfür bislang keine belastbaren Daten zur Verfügung stehen.

Unter verschiedenen Aspekten müssen die vorgestellten Möglichkeiten kritisch betrachtet werden. Transgene Pflanzen mit veränderten, agronomisch interessanten Eigenschaften (vor allem Herbizid- und Insektenresistenz) werden seit einem guten Jahrzehnt gewerblich angebaut. Der Anbau dieser transgenen Pflanzen der ersten Generation führt nicht zu Ertragssteigerungen im engeren Sinne. Angesichts der neuen Ansätze zur Schädlings- und Unkrautbekämpfung lassen sich Ertragssteigerungen im wirtschaftlichen Sinne erwarten. Bislang fehlen jedoch belastbare Zahlen zu größerflächigen und längerfristigen Effekten hinsichtlich tatsächlicher Einsparungen beim Pflanzenschutz (IAASTD, 2008; Levidow und Paul, 2008). Alle anderen oben genannten transgenen Ansätze bzw. Entwicklungen, deren Anbau weitere Optimierungsmöglichkeiten im Rahmen der Bioenergienutzung bieten könnten, befinden sich derzeit noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium.

Eine Steigerung des Biomasseertrags der gesamten Pflanze, die im Hinblick auf die „Ganzpflanzennutzung für Bioenergiezwecke" ein wesentliches Ziel darstellt, d.h. eine Ertragssteigerung für Bioenergiezwecke im engeren Sinne zu erreichen, konnte bislang weder mit konventionellen noch mit biotechnologischen Methoden erzielt werden (Levidow und Paul 2008). Es stellt sich hier die Frage, ob es überhaupt möglich ist, den Gesamtenergiegehalt einer Pflanze ohne zusätzlichen Input an Nährstoffen, Wasser usw. zu steigern, oder ob generell nur die zur Verfügung stehende Energie umverteilt werden kann. Sehr häufig gehen bestimmte Züchtungserfolge, z.B. eine höherer Körnerertrag, einher mit einer Reduktion etwa der Halmmasse. Bislang unternommene Versuche, die Photosynthesewege von Pflanzen zu optimieren, blieben erfolglos (Rosegrant und Cavalieri, 2008).

Die Nutzung von für die landwirtschaftliche Produktion ungeeigneten Standorten für Bioenergiezwecke gilt als eine Option im Rahmen einer nachhaltigen Strategie zur Biomassenutzung. An solchen Standorten können jedoch nur stresstolerante Pflanzen gedeihen. Die Entwicklung stresstoleranter, transgener Sorten wird seit den 1990er Jahren verstärkt verfolgt (Schmitz und Schütte, 2000). Nach wie vor ist jedoch der Kenntnisstand über die vergleichsweise komplexen physiologischen und biochemischen Mechanismen, die bei Pflanzen zu Toleranzen gegenüber abiotischen Stressfaktoren (Trockenheit, Hitze, Salz, Überflutung) führen, relativ gering. Entsprechende Eigenschaften beruhen häufig auf einer Vielzahl von Genen und komplexen Regulationsmechanismen. Die meisten der bisherigen gentechnischen Forschungsansätze setzen jeweils an einzelnen Komponenten dieser komplexen Eigenschaften an, obwohl fast alle bisherigen Erkenntnisse auf diesem Gebiet darauf hin deuten, dass nur die gleichzeitige Übertragung der genetischen Grundlagen für mehrere Stressantworten in eine Pflanze dazu führen kann, wirklich stresstoleranten Pflanzen herzustellen (Holmberg und Bülow, 1998). Als ein Schlüsselfaktor wird das Wissen um die regulativen Gene angesehen, die die komplexen Genantworten auf abiotischen Stress in den Pflanzen koordinieren (Datta, 2002). Eine Übersicht, welche Ansätze bei der Entwicklung transgener stresstoleranter Pflanzen derzeit verfolgt werden, findet sich bei Teufel (2005).

Bislang publizierte Ergebnisse zu stresstoleranten transgenen Pflanzen basieren in der Regel auf Versuchen, die unter Laborbedingungen oder im Gewächshaus durchgeführt wurden. Eine realistische Einschätzung, ob und wann marktreife gentechnisch veränderte stresstolerante Pflanzen zur Verfügung stehen können, ist derzeit nicht möglich.

Eine weitere Gruppe von gentechnisch veränderten Nutzpflanzen, deren Anbau unter Umständen die Bioenergieproduktion optimieren könnte, gehören zu denjenigen transgenen Pflanzen, die sich durch geänderte Nutzungseigenschaften, den so genannten „Output-Traits", auszeichnen. Hierbei handelt es sich um im Hinblick auf die Bioenergieproduktion optimierte bzw. veränderte Nutzpflanzen. Als Beispiele lassen sich hier die Forschungsbemühungen zur Entwicklung einer Maissorte für die Produktion von Ethanol nennen, deren Ziel ist, die Stärkeausbeute aus der Maissorte zu erhöhen, oder die Entwicklung von Ölsaaten, die einen höheren Ölgehalt besitzen. Obwohl an entsprechenden Konzepten seit vielen Jahren intensiv gearbeitet wird, und auch schon vor Jahren die beiden ersten entsprechenden gentechnisch veränderten Pflanzen (der so genannte Laurinraps und eine Sojabohne mit erhöhtem Ölsäuregehalt) in den USA zugelassen, aber bislang erfolglos kommerzialisiert worden sind, scheint eine Nutzung derart gentechnisch veränderter Organismen (GVO) in der näheren Zukunft nicht realisierbar zu sein (TAB, 2005). Im Rahmen eines Gutachtens des Büro für Technikfolgen-

Abschätzung beim Deutschen Bundestag zu transgenen Pflanzen der zweiten und dritten Generation (TAB, 2005) wird u.a. als Grund hierfür genannt, dass in einigen Fällen die Erwartungen vor allem bezüglich erreichbarer Produktausbeuten auch nach Jahren der Entwicklung nicht erfüllt worden sind. Im Zuge der Inhaltsstoffmaximierung traten (bzw. treten) in vielen Fällen unerwünschte Nebeneffekte auf, die dann zu Ertragsdepressionen führen. Auch hat sich gezeigt, dass die gezielte Beeinflussung des Fettstoffwechsels von Pflanzen durch gentechnisch veränderte Eingriffe weitaus komplizierter ist als ursprünglich angenommen, obwohl gerade der Fettstoffwechsel in Pflanzen auf molekularer Ebene weitgehend erforscht ist (TAB, 2005).

Ökologische und sozio-ökonomische Risiken der Nutzung von GVO für die Bioenergieproduktion

Im Rahmen der Diskussion über die ökologischen Risiken der Nutzung von GVO für die Bioenergieproduktion können prinzipiell die gleichen Risiken genannt werden, die auch für den Anbau von transgenen Pflanzen der ersten Generation für die Lebens- und Futtermittelproduktion diskutiert werden. Dazu gehören vor allem die unkontrollierte und unerwünschte Verbreitung der GVO und ihrer Transgene durch Verwilderung (z.B. durch vegetative Vermehrung), Auskreuzung und horizontalen Gentransfer als allgemeine Folgeerscheinungen sowie mögliche spezifische Auswirkungen der transgenen Merkmale auf Nicht-Zielorganismen bzw. auf das gesamte jeweilige betroffene Ökosystem (TAB, 2000, 2005). Das mögliche Schadenspotenzial einer solchen unkontrollierten und unerwünschten Verbreitung hängt vor allem von der Art der Transgene bzw. der durch sie vermittelten Eigenschaften ab. Als Beispiel lässt sich hier die Auskreuzung von Herbizidresistenzgenen von gentechnisch veränderten herbizidresistenten Rapssorten auf nah verwandte Wildarten in Kanada nennen, die sich infolge dessen zu Problemunkräutern für die Landwirtschaft entwickelten.

Grundsätzlich muss damit gerechnet werden, dass die Fitness und Konkurrenzkraft einer Pflanze durch eine erhöhte Stresstoleranz zunimmt. Dadurch kann das Potenzial für eine Verbreitung solcher Pflanzen, bzw. bei Auskreuzung auch das von nah verwandten Wildarten, zunehmen. Wenn der entsprechende Stressfaktor, gegen den die Pflanze tolerant ist, einen begrenzenden Faktor für die Ausbreitung darstellt, besteht eine besondere Gefahr, dass stresstolerante Pflanzen sich großflächig etablieren und sich zu Problemunkräutern mit wirtschaftlichen Folgen für die Landwirtschaft entwickeln (Schmitz und Schütte, 2000).

Als Bioenergieträger wird auch der Einsatz transgener Bäume diskutiert. Aufgrund der Langlebigkeit von Bäumen und dem üblicherweise späten Eintreten ihrer Fortpflanzungsfähigkeit können bislang keine fundierten Aussagen über die Stabilität der eingeführten Eigenschaften und über deren Umweltauswirkungen getroffen werden. Belastbare Aussagen hierzu müssten auf Daten beruhen, die über Jahrzehnte hinweg gesammelt worden sind (Pickardt und de Kathen, 2002; Farnum et al., 2007; Schmidt, 2008). Im Rahmen der 9. Vertragsstaatenkonferenz der Biodiversitätskonvention wurde deshalb vereinbart, dass die Freisetzung transgener Bäumen nur auf Grundlage des Vorsorgeansatzes erfolgen darf bzw. aufgrund mangelnder Daten zur biologischen Sicherheit eine Freisetzung verboten werden soll. Diese Vereinbarung beinhaltet auch, dass die Risiken der Freisetzung über lange Zeiträume zu prüfen sind, und die Aussagen über potenzielle Umweltwirkungen mit belastbaren experimentell ermittelten Daten abgesichert werden. Neben den ökologischen Umweltauswirkungen sollen auch die möglichen sozioökonomischen Wirkungen auf lokale und indigene Gemeinschaften geprüft werden. Insgesamt sollen für transgene Bäume spezifische Kriterien für die Risikobewertung entwickelt werden (CBD, 2008a).

Ein weiteres Risiko stellt der Anbau von gentechnisch veränderten Energiepflanzen dar, wenn die Pflanzenart auch für die Nahrungsmittelproduktion angebaut wird. Hier besteht ein Kontaminationspotenzial der Nahrungsmittelkette mit potenziellen Risiken für die menschliche Gesundheit. Neben diesen Umwelt- und Gesundheitseffekten bestehen ökonomische Risiken, die vor allem für Entwicklungsländer eine wichtige Rolle spielen. Durch Sortenschutz und Patente kann eine Konzentration landwirtschaftlicher Eigentums gefördert und der Austausch von pflanzengenetischem Material erheblich behindert werden. Alternativen zu gentechnisch veränderten Pflanzen könnten so auf lange Sicht verdrängt werden (IAASTD, 2008).

Fazit

Nach dem derzeitigen Wissensstand kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Gentechnik in den nächsten 10 Jahren einen substanziellen Beitrag zur Erweiterung der Bioenergiepotenziale leisten kann. In Anbetracht der potenziellen ökologischen und ökonomischen Risiken sollte die unter Umständen zu Debatte stehenden Zulassung einer potenziellen gentechnisch veränderten Pflanze für die Bioenergieproduktion erst nach umfangreichen Umweltrisikoprüfungen erfolgen, die schrittweise erfolgen sollten. Das heißt, erst nach einer umfangreichen Prüfung im Labor und im Gewächshaus kann eine Entscheidung darüber gefällt werden, ob weitere für die Zulassung notwendige Freilandexperimente verantwortbar sind. Ein verantwortungsbewusstes Abwägen des Einsatzes von GVO für Bioenergiezwecke kann nur anhand umfangreicher und sorgfältig erhobener Daten erfolgen und ist somit mit sehr hohem Forschungsaufwand verbunden.

Es wird empfohlen, dass weitere Forschungsvorhaben zum Einsatz und der Nutzung biotechnologischer Methoden vor allem in den Bereichen der markergestützten Züchtung und der Nutzung der sogenannten „Weißen Biotechnologie“ in geschlossenen Systemen, z.B. für eine Optimierung der Ausnutzung der vorhandenen Biomasse, gefördert und durchgeführt werden sollten. Diese Empfehlungen werden u.a. auch im Weltagrarbericht (IAASTD, 2008) gegeben. Um unerwünschte Folgen von GVO beim Einsatz von Energiepflanzen zu vermeiden, sollten sie in den Nachhaltigkeitsstandards berücksichtigt werden (Kap. 10.3).

derungen der Biodiversität scheinen zwar in Kurzzeitmessungen gering, Langzeitstudien dazu fehlen allerdings.

Grundsätzlich scheint also eine nachhaltige Nutzung tropischer Primärwälder nach heutigem Erkenntnisstand fast nicht möglich zu sein, da das Ökosystem einerseits sehr empfindlich auf Störungen reagiert und andererseits aufgrund sozioökonomischer Determinanten bereits flächenmäßig kleine Eingriffe, z.B. der Bau einer Straße, innerhalb weniger Jahre zur Entwaldung führen. Im Bereich nach-

haltiger Forstwirtschaft existieren heute verschiedene Zertifizierungssysteme (Kap. 9.3.2.1).

7.1.5.2 Biomassenutzung in temperaten Wäldern

Die temperaten Wälder liegen vorwiegend in der nördlichen Hemisphäre, in Europa, Ostasien und dem östlichen Nordamerika. Ihr Anteil an der weltweiten Waldfläche liegt bei 25 % (Fischlin et al., 2007). In der EU ist ca. ein Drittel der Gesamtfläche von Wald bedeckt, wovon 12 % unter Schutz steht. Etwa zwei Drittel der europäischen Wälder befinden sich in Privatbesitz (EU-Kommission, 2005d). In Deutschland beläuft sich die jährliche Holznutzung auf schätzungsweise 65 Mio. m^3 (BMELV, 2008).

Neben der stofflichen Nutzung (Bau-, Papier-, Zellstoffindustrie) gewinnt die Restholznutzung für Energiezwecke in Wäldern der entwickelten Länder zunehmend an Bedeutung. Im Fokus steht der nach dem Fällen liegen gebliebene Schlagabraum, unbewirtschaftete Aufwüchse und für industrielle Zwecke ungeeignete Einzelbäume. Je nach Bewirtschaftungsart des Waldes fallen unterschiedliche Mengen und Arten von Restholz an. Unbewirtschaftete, „überreife“ Wälder, die im Kahlschlagverfahren geerntet werden, enthalten mehr Restholz aus toten und kranken Bäumen, während Restholz aus bewirtschafteten Wälder vorwiegend aus Kronenholz und beim Ausdünnen geschlagenen, zu kleinen Bäumen besteht (Hakkila und Parikka, 2002).

Kriterien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung umfassen neben den sozioökonomischen Aspekten auch die Waldgesundheit, die Produktionskapazität, die Biodiversität, den Wasserhaushalt, die Bodenqualität, sowie die Kohlenstoffbilanz (Raisen, 2005). Die Nachhaltigkeitsprinzipien des Forest Stewardship Council (FSC, 1996) fordern außerdem, dass einmalige und empfindliche Ökosysteme und Landschaften trotz Nutzung erhalten bleiben und die ökologischen Funktionen und die Unversehrtheit des Waldes gewährleistet werden (BUWAL, 1999).

Baumpflanzungen mit Laubbäumen haben gemäß einer Metastudie von Guo und Gifford (2002) gegenüber dem temperaten Primärwald keine Einbuße des Kohlenstoffvorrats im Boden zur Folge. Bei Kiefernplantagen hingegen nimmt der Kohlenstoffvorrat im Boden gegenüber dem Primärwald bei Regenmengen über 1.500 mm pro Jahr ab (Guo und Gifford, 2002). Eine Chronosequenz-Studie eines genutzten Buchenwalds zeigt, dass sich die Menge an gespeichertem Kohlenstoff im Boden innerhalb der Rotationszyklen nicht signifikant ändert (Hedde et al., 2008). Bei der Modellierung der Auswirkung einer Restholznutzung auf die Kohlenstoffbilanz eines Waldes fällt das Resultat je nach benutztem Modell jedoch sehr unterschiedlich aus (Palosuo et al., 2008).

Eine zukünftige Restholznutzung wird sich stark auf die Waldflora und -fauna auswirken, da sich mit dem Entfernen von Biomasse das Mikroklima, die Bodeneigenschaften und die Nährstoffverhältnisse ändern und dadurch die Interaktionen zwischen Arten im Ökosystem beeinflusst werden (EEA, 2007a). Die Ressourcennutzung in Europäischen Wäldern ist heute regional sehr unterschiedlich. Während vor allem in Finnland, dem Baltikum und in Belgien die Extraktionsrate von Biomasse aus Wäldern sehr hoch ist, liegt sie z.B. in Frankreich bei 56 % und in Italien bei lediglich 47 % des Ressourcenpotenzials (EEA, 2007a). Um eine nachhaltige Nutzung von Restholz zu gewährleisten, legt die Europäische Umweltagentur aufgrund von Modelldaten eine Extraktionsrate von maximal 60 % der Ressourcenpotenzials in Europäischen Wäldern fest, wobei Parameter wie die Hangneigung, der Wasserhaushalt und die Bodenfruchtbarkeit zu berücksichtigen sind (EEA, 2007a).

7.1.5.3 Biomassenutzung in borealen Wäldern

Boreale Wälder bilden das nördlichste Biom mit Baumbewuchs und erstrecken sich über Eurasien und Nordamerika ungefähr zwischen 50° nördlicher Breite und dem Polarkreis. Ein Drittel der weltweiten Waldfläche liegt in der borealen Zone (Fischlin et al., 2007). Boreale Wälder speichern 26 % der terrestrischen Kohlenstoffvorräte, was den Kohlenstoffspeichern von tropischen und gemäßigten Wäldern zusammen entspricht (UNEP, 2002). In Russischen Wäldern führten in den 1990er Jahren neben Kahlschlägen auch Wildfeuer, Schadinsektenbefall und ungünstige Wetterereignisse zu großen Waldverlusten (UNEP, 2002).

Holz aus Wäldern hat in den nordeuropäischen Staaten einen Anteil von 10 % an der gesamten genutzten Biomasse (Lunnan et al., 2008). Finnland und Schweden verfügen über die größten Biomassevorräte (Röser et al., 2008). In Finnland werden 20 % des Energiebedarfs über Holzprodukte – größtenteils Restholz und Schlagabraum – gedeckt (Lunnan et al., 2008). Röser et al. (2008) schätzen das Bioenergiepotenzial der Restholznutzung in den baltischen und nordeuropäischen Wäldern auf 58 Mio. m^3 pro Jahr, was ungefähr 116 TWh pro Jahr Energie entspricht.

Mit der Restholznutzung wird den Organismen, die vom Totholz leben, die Nahrungsgrundlage entzogen. Jonsell et al. (2007) fanden auf Schlagabfäl-

Tabelle 7.1-5
Zusammenfassung und qualitative Bewertung der Produktivität, der Auswirkung auf die Biodiversität und die Kohlenstoffspeicherung im Boden der vorgestellten Anbausysteme. Eine gelbe Wertung weist darauf hin, dass je nach Vornutzung und Anbaumethoden unterschiedliche Auswirkungen auf die genannten Faktoren möglich sind. Die Farbwertung der Gesamtbeurteilung entspricht der Farbwertung der Mehrzahl der untersuchten Faktoren.
Quellen: Produktivität: s. Legende; Biodiversität und Kohlenstoffspeicherung im Boden: qualitative Einschätzung des WBGU

Anbausysteme	Produktivität [t Trockenmasse/ha/Jahr]	Quellen	Bewertung Produktivität	Bewertung Biodiversität	Bewertung Bodenkohlenstoff	Gesamtbewertung
Tropische Monokulturen						
Einjährig						
Zuckerrohr	10–120; 80; 70 (a)	1, 3 ,5				
Mehrjährig						
Zuckerrohr	10–120; 80; 70 (a)	1, 3, 5				
Ölpalme	30; 13,8 (b)	3, 5				
Jatropha	0,2–8; 0,5–12 (b)	3, 4				
Temperate Monokulturen						
Einjährig						
Mais	8–14*; 9; 9 (d)	2, 5, 6				
Raps	4,1; 3,4; 3 (c)	1, 5, 6				
Triticale	3,5–9**; 5,6; 6 (d)	2, 5, 6				
Mehrjährig						
Chinaschilf	bis 30; 10–27,5; 11-40 (a)	1, 2, 3				
Rutenhirse	12–17; 5,2–11,1 (a)	7, 8				
KUPs: Pappel/Weide	4–16/2–14; 12–15/5–20 (a)	2, 3				
Grasland						
Tropisches Grasland, Weide	k. A.					
Temperates Grasland, Grünlandsysteme						
Kunstwiesen	7–15 (e)	2				
Dauergrasland	7–12 (f)	2				
Wälder						
Waldfeldbau	k. A.					
Restholz aus Wäldern						
tropisch	k. A.					
temperat	k. A.					
boreal	k. A.					

Auswirkungen
negativ
nicht eindeutig
positiv
k. A. keine Angaben

Quellen
1: Lieberei et al., 2007
2: KTBL, 2006
3: El Bassam, 1998
4: Openshaw, 2000
5: FAOSTAT, 2007
6: LfL Bayern, 2008
7: TFZ: 2008
8: Schmer et al., 2008

(a) weltweit
(b) Samenertrag, weltweit
(c) Samenertrag, Deutschland
(d) Kornertrag, Deutschland
(e) in Rotation, Deutschland
(f) Dauergrasland

* TM-Gehalt = 70 %
** TM-Gehalt = 86 %

len über 160 saprophile Käferarten, wovon 22 Arten auf der Roten Liste stehen. Während auf Totholz von Laubbäumen wie Erlen und Eichen eine große Käfervielfalt gefunden wurde, war das Vorkommen auf Fichtentotholz gering (Jonsell et al., 2007). Bei einer nachhaltigen Restholznutzung sollte die Artenzusammensetzung des Baumbestandes unbedingt mit berücksichtigt werden.

7.1.6 Zusammenfassende Bewertung der gegenwärtig vorherrschenden Anbaumethoden

Grundsätzlich sind Anbaukulturen schlechter für die Biodiversität und die Kohlenstoffspeicherung im Boden als Wald oder Grasland respektive Weide. Mehrjährige Kulturen wie *Jatropha*, Ölpalme und KUPs sind bezüglich der genannten Faktoren positiver zu bewerten als 1–3 jährige Kulturen wie Raps, Getreide oder Mais. Zuckerrohr, das sowohl einjährig wie mehrjährig kultiviert werden kann, weist im einjährigen Anbau ebenfalls eine schlechtere Bilanz auf als im mehrjährigen Anbau. (Tab. 7.1-5).

7.2 Technisch-ökonomische Analyse und Bewertung von Bioenergienutzungspfaden

7.2.1 Übersicht der energetischen Nutzungsmöglichkeiten

Die Möglichkeiten, Energie aus Biomasse bereitzustellen, sind sehr vielfältig (Abb. 7.2-1). Biomasse hat einen entscheidenden Vorteil gegenüber anderen erneuerbaren Energiequellen: sie liegt meist in Form eines Energiespeichers vor bzw. ist ohne zusätzlichen technischen Aufwand speicherbar. Ein weiterer Vorteil ist ihre universelle Verwendbarkeit im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor. Große Teile der Wärme- und Mobilitätsversorgung können jedoch auch durch die Stromerzeugung von anderen erneuerbaren Energien übernommen werden, weshalb letztendlich vor allem der Vorteil der Speicherbarkeit den Vorzug der Bioenergie gegenüber anderen erneuerbaren Energien darstellt.

Ein Nutzungspfad bzw. eine Bereitstellungskette umfasst alle Prozesse, beginnend mit dem Anbau von Energiepflanzen bzw. der Verfügbarmachung biogener Reststoffe oder Abfälle bis hin zur Bereitstellung von Endenergie (Strom, Wärme, Kraftstoffe). Diese Bereitstellungsketten können in verschiedene Teilprozesse aufgeteilt werden. Es wird unterschieden zwischen

- Biomasseproduktion
- Biomassebereitstellung
- Biomasseumwandlungsverfahren (Konversionsprozesse)
- Energetischer Nutzung
- Verwertung und Entsorgung der anfallenden Rückstände und/oder Abfälle

Die Teilprozesse sind voneinander abhängig, so dass für eine Bewertung die gesamte Prozesskette betrachtet werden muss.

Jeder Teilabschnitt stellt eine Summe aus vielen einzelnen Prozessschritten dar (FNR, 2005). Im Folgenden werden die wesentlichen technischen Prozesse kurz erläutert.

7.2.2 Technologien zur Energieumwandlung / Energiewandlungsverfahren

7.2.2.1 Verbrennung und thermo-chemische Verfahren

Verbrennung ist die Oxidation eines Brennstoffes in Gegenwart von Sauerstoff unter Energiefreisetzung. Chemisch gesehen, wird Kohlenstoff (C) oder Wasserstoff (H) mit Hilfe von Sauerstoff (O_2) zu Kohlendioxid (CO_2) oder Wasser (H_2O) oxidiert. Die Reaktion ist exotherm, d.h. es wird Energie frei. Die maximal freigesetzte Energie bei der Verbrennung von Kohlenstoff zu CO_2 beträgt z.B. 394 kJ/mol, d.h. es werden 394 kJ/mol Wärme frei; bei der Verbrennung von Wasserstoff zu Wasserdampf sind dies 242 kJ/mol.

Dem Prozess wird gewöhnlich mehr Oxidationsmittel (Sauerstoff) zugeführt als zur vollständigen Oxidation notwendig. Die Verbrennung eines festen Brennstoffs setzt sich zusammen aus den Teilprozessen pyrolytische Zersetzung (siehe Pyrolyse), Vergasung und anschließender Oxidation der Zersetzungsprodukte. Läuft die Verbrennung vollständig ab, wird sie als stöchiometrische Verbrennung bezeichnet (Kaltschmitt und Hartmann, 2003).

Die direkte Verbrennung von fester Biomasse in Feuerungsanlagen (großtechnische Feuerungen, Kaminöfen, Pelletöfen usw.) oder Kesseln ist das am weitesten verbreitete Energiewandlungsverfahren für biogene Festbrennstoffe wie Holz oder Stroh. Verbrennungsanlagen werden zur Produktion von Wärme eingesetzt, die als Sekundärenergie (z.B. als Dampf, der mechanisch Turbinen antreibt, die die Energie über einen Generator in elektrische Energie umwandeln), als Endenergie (z.B. Fernwärme) oder als Nutzenergie (z.B. Strahlungswärme eines Kachelofens) genutzt wird.

Eine gemeinsame Nutzung von fester Biomasse mit fossilen Energieträgern, die sogenannte Ko- oder Mitfeuerung, ist möglich und in vielen Feuerungsanlagen Stand der Technik. Beispiele hierfür sind eine Nahwärmeversorgung im kleinen Maßstab, in der zur Abdeckung des Grundlastbedarfs Biomasse und zur Spitzenlastabdeckung leichtes Heizöl oder Erdgas

Kasten 7.2-1

Definitionen

Biomasse ist vielfältig in ihrem Ursprung wie auch in ihren technischen Umwandlungs- und Nutzungsmöglichkeiten. Im Folgenden werden daher die Begriffe Biomasse, Bioenergie und deren Nutzungsmöglichkeiten definiert.

BIOMASSE
Biomasse speichert Solarenergie. Bei der Photosynthese werden CO_2 und Wasser mit Hilfe der solaren Strahlung in organische Materie umgesetzt. Ein Teil der aufgenommenen Energie wird bei der Verbrennung von Biomasse wieder freigesetzt und kann so genutzt werden. Biomasse besteht im Wesentlichen aus den Elementen Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H) und kann mit der chemischen Summenformel $C_nH_mO_p$ beschrieben werden. Allgemeiner umfasst der Begriff „Biomasse" laut Kaltschmitt und Hartmann (2003) sämtliche Stoffe organischer Herkunft, einschließlich

- alle in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere)
- die daraus anfallenden Rückstände (z.B. tierische Exkremente)
- abgestorbene (noch nicht fossile) Phyto- und Zoomasse
- im weiteren Sinne alle (Rest-)Stoffe, die durch eine technische Umwandlung und/oder einer stofflichen Nutzung biogener Rohstoffe entstanden sind (z.B. Schwarzlauge, Papier- und Zellstoff, Reststoffe aus der Tierkörperverwertung und der Abfallwirtschaft usw.)

Biomasse wird in Primär- und Sekundärprodukte unterteilt. Primärprodukte entstehen direkt mit Hilfe der Photosynthese, d.h. dazu zählt die gesamte Pflanzenbiomasse (Energiepflanzen und pflanzliche Nebenprodukte aus Land- und Forstwirtschaft). Sekundärprodukte entstehen indirekt aus der Umwandlung von Primärprodukten, d.h. sie werden durch den Ab- oder Umbau organischer Materie in heterotrophen Organismen (z.B. Tiere, Bakterien) gebildet. Hierzu gehört die gesamte Zoomasse, deren Exkremente und Klärschlamm.

Biomasse wird entweder gezielt durch den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRo) erzeugt oder sie fällt als organischer Reststoff in anderen Herstellungsprozessen an. Zu den nachwachsenden Rohstoffen zählen Energiepflanzen (z.B. Getreide, *Miscanthus*, Waldholz), zu den organischen Reststoffen Ernterückstände (z.B. Stroh, Waldrestholz) sowie organische Abfälle und Nebenprodukte (z.B. Gülle, Biomüll, Tierfette, Grünschnitt) (Kaltschmitt und Hartmann, 2003; FNR, 2005).

BIOENERGIE
Bioenergie ist die End- bzw. Nutzenergie, die aus Biomasse freigesetzt und bereitgestellt werden kann.

BIOKRAFTSTOFFE
Unter Biokraftstoffen versteht man flüssige oder gasförmige Kraftstoffe biogenen Ursprungs, die hauptsächlich im Verkehr als Antriebsmittel aber auch zur Strom- und Wärmeerzeugung z.B. in Blockheizkraftwerken (BHKW) eingesetzt werden. Es wird zwischen erster und zweiter Generation von Biokraftstoffen unterschieden. Zur ersten Generation zählen Pflanzenöl, Biodiesel und Bioethanol, die aus etablierten physikalisch-chemischen (Pressung, Extraktion, Veresterung) oder biochemischen (Alkoholgärung) Verfahren gewonnen werden. Zur zweiten Generation zählen synthetische Biokraftstoffe wie BtL (Biomass-to-Liquid, Fischer-Tropsch-Diesel), Biomethan bzw. Bio-SNG (Synthetic Natural Gas) oder Bio-Wasserstoff, die über thermochemische Verfahren (Vergasung, Pyrolyse) hergestellt werden. Diese Technologien befinden sich fast ausschließlich noch im Labor- oder Demonstrationsstadium. Auch Biomethan aus Vergärung kann zur zweiten Generation gezählt werden. Die Einteilung in erster und zweiter Generation Biokraftstoffe ist nicht sehr stringent und orientiert sich je nach Literatur an unterschiedlichen Parametern wie der Verwendung von Pflanzenteilen (1. Gen.) oder der Ganzpflanze (2. Gen.) aber auch, ob diese bereits am Markt etabliert sind oder nicht. Der WBGU bezeichnet daher flüssige und gasförmige Kraftstoffe als zweite Generation, wenn es sich um Biomethan handelt oder die Kraftstoffe aus thermo-chemischen Verfahren gewonnen werden.

BIOGAS
Biogas ist ein Gasgemisch aus ca. zwei Dritteln Methan (CH_4) und ca. einem Drittel Kohlendioxid (CO_2). Weiter befinden sich im Biogas noch geringe Mengen an Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und anderen Spurengasen. Biogas entsteht bei der Vergärung (anaerobe Fermentation) von organischen Stoffen. Der energetisch nutzbare Anteil des Gases ist das Methan (FNR, 2006a).

BIOMETHAN
Aus Biogas können die nicht energetisch nutzbaren Gase wie CO_2 und andere Schadkomponenten (z.B. Schwefelwasserstoff) abgetrennt werden, wodurch es auf Erdgasqualität gebracht wird. Das so genannte Biomethan kann in die bestehenden Erdgasnetze eingespeist werden und in allen Endenergiebereichen (Strom, Wärme, Kraft – elektrische, thermische und mechanische Energie) genutzt werden. Biomethan kann auch über die Vergasung von fester und flüssiger Biomasse zu einem Rohgas hergestellt werden, das nach einer Reinigung (Reingas) und Konditionierung (Synthesegas) über eine Methansynthese in Biomethan (Bio-SNG; Bio-Synthetic Natural Gas) umgewandelt wird (IE, 2007a).

eingesetzt wird. Große Kohlekraftwerke setzen feste Biomasse in Form von Pellets in der Mitverbrennung zur Strom- und Wärmebereitstellung ein.

In den Entwicklungsländern stellt die Verbrennung von fester Biomasse den größten Anteil der Wärmeerzeugung (v.a. zum Kochen) dar (Kap. 4.1).

Durch eine thermo-chemische Umwandlung von Biomasse (Verkohlung, Vergasung, Pyrolyse bzw. Verflüssigung) werden die organischen Ausgangsstoffe primär durch Wärmeeinfluss in gasförmige, flüssige oder feste Energieträger umgewandelt (Abb 7.2-1) (FNR, 2005).

VERKOHLUNG
Unter der Verkohlung von Biomasse wird die Veredelung fester Biomasse mit dem Ziel einer hohen Ausbeute an Festbrennstoff (Holzkohle) mit bestimmten Eigenschaften (geringes Gewicht, hoher Energiege-

Abbildung 7.2-1
Vereinfachte Darstellung typischer Bereitstellungsketten zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse (farbig unterlegte Kästen: Energieträger, grau unterlegte Kästen: Umwandlungsverfahren).
Quelle: WBGU, verändert nach Kaltschmitt und Hartmann, 2003

halt) verstanden. Biomasse wird hierbei unter Einwirkung von Wärme zersetzt. Die dafür notwendige Prozessenergie kommt häufig aus einer Teilverbrennung des Rohstoffes. Die entstandene Holzkohle kann anschließend in den entsprechenden Anlagen zur Wärme- und Strombereitstellung verwendet werden. Auch eine stoffliche Nutzung (z.B. als Aktivkohle) ist möglich. Die Technik zur Holzkohleherstellung ist etabliert. In Industriestaaten wird Holzkohle fast ausschließlich stofflich genutzt, u.a. in der chemischen Industrie (FNR, 2005). In Entwicklungs- und Schwellenländern wird die Verkohlung dezentral eingesetzt und Holzkohle oft als Brennstoff für den Wärmebedarf (v.a. Kochen) verwendet. Der Zwischenschritt der Verkohlung weist allerdings nur einen Wandlungsgrad von ca. 15–40 % von Holz zu Holzkohle auf und ist im Vergleich zur direkten Verbrennung für Energieanwendungen weder technisch noch ökonomisch attraktiv. Daher setzt sich die energetische Nutzung in Industriestaaten nicht durch (FNR, 2005). In den Entwicklungs- und Schwellenländern wird Holzkohle auf breiter Basis eingesetzt, da der spezifische Energiegehalt von Holzkohle viel höher ist als von Feuerholz selbst und dadurch leichter zu transportieren ist. Der Wirkungsgrad der Holzkohlenutzung in diesen Ländern wird jedoch zusätzlich durch eine geringe Effizienz der verwendeten Holzkohleöfen verschlechtert. Eine bislang wenig diskutierte alternative Verwendung ist die Kohlenstoffsequestrierung durch Einlagerung von Holzkohle in Böden zur Verbesserung der Fruchtbarkeit. CO_2 kann so der Atmosphäre entzogen werden und der erhaltene Kohlenstoff (C) über einen langen Zeitraum gespeichert bleiben (Kap. 5.5).

Vergasung

Bei der Vergasung wird aufbereitete feste oder flüssige Biomasse unter hohen Prozesstemperaturen möglichst vollständig in ein hochkalorisches biogenes Gas umgewandelt (Rohgas, Schwachgas). Bei der Vergasung wird der Biomasse weniger Sauerstoff über ein Vergasungsmittel zugeführt als für eine vollständige Verbrennung erforderlich wäre (partielle Oxidation, unterstöchiometrisch). Eine Prozesswärmezufuhr ist notwendig, da bei der Vergasung mehrheitlich endotherme chemische Reaktionen ablaufen, d.h. Reaktionen, die Energiezufuhr von außen benötigen. Als Vergasungsmittel werden Luft, Sauerstoff, Wasserdampf oder Kohlendioxid verwendet. Nachteilig ist beim Einsatz von Luft der hohe Inertgasanteil im Rohgas. Für die Herstellung von synthe-

tischem Kraftstoff kommen daher meist reiner Sauerstoff oder Wasserdampf zum Einsatz.

Der Vorgang der Vergasung lässt sich grob in vier verschiedene Bereiche aufteilen. Zunächst findet eine Aufheizung und Trocknung des Brennstoffs bei Temperaturen bis ca. 200°C statt. Anschließend erfolgt die pyrolytische Zersetzung. Dabei entstehen in Abwesenheit von Sauerstoff bei ungefähr 200–500°C gasförmige Kohlenwasserstoffverbindungen, Pyrolyseöle und Pyrolysekoks. Anschließend kommt es zur Oxidation. Bei Temperaturen von ca. 2.000°C erfolgt die Aufspaltung des Kokses und eines Teils der höheren Kohlenwasserstoffe in kleinere gasförmige Moleküle (CO, H_2, CO_2, CH_4 und Wasserdampf). Durch die sich anschließende Reduktion von Kohlendioxid und Wasser wird der größte Teil der brennbaren Bestandteile des Rohgases gebildet. Dieses besteht hauptsächlich aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff, Kohlendioxid, Methan, höheren Kohlenwasserstoffen sowie Wasserdampf und ggf. Stickstoff. Die Gaszusammensetzung ist abhängig von der Art der Vergasung, vom Vergasungsmittel (Art und Menge) und von den Reaktionsbedingungen (Temperatur und Druck; Sterner, 2007; Kaltschmitt und Hartmann, 2003). Neben diesen Hauptkomponenten (CO, CO_2, H_2, CH_4, C_2-Kohlenstoffverbindungen, Wasserdampf, N_2) enthält das bei der Vergasung entstehende Gas noch verschiedene Schadkomponenten (Teere, Partikel, Alkalien, Schwefel-, Halogen- und Stickstoffverbindungen), die vor der weiteren Verwendung des Rohgases entfernt werden müssen. Diese zum Teil sehr aufwändige Reinigung des Gases ist das Nadelöhr für die Entwicklung und Markteinführung von Vergasern im dezentralen Bereich (Kaltschmitt und Hartmann, 2003; Knoeff, 2005).

Das ungereinigte Gas kann direkt in Brennern zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden. Für die Strombereitstellung ist eine Gasreinigung notwendig, da das direkt verwendete Rohgas den Motor stark verunreinigen und funktionsunfähig machen würde. Die Möglichkeiten zur Verstromung von Reingas sind vielfältig: Es kann als Dieselsubstitut in einem Dieselmotor beigefeuert werden oder pur in Gasmotoren oder -turbinen mit gekoppelten Generatoren verstromt werden. Weiter besteht die Möglichkeit, das Reingas über Brennstoffzellen zur Strombereitstellung zu nutzen. Hierbei sind die Entwicklungen unter Verwendung von Solid-Oxid Fuel Cells (SOFC) am Weitesten vorangeschritten (Aravind, 2006; IISc, 2006). Es gibt viele weitere Verwendungsmöglichkeiten, die an dieser Stelle nicht näher erläutert werden. Alternativ kann das gereinigte Gas nach einer weiteren Aufbereitung (insbesondere der Einstellung des erforderlichen H_2/CO-Verhältnisses) einer Synthese zugeführt werden und in flüssige Energieträger (Fischer-Tropsch-Diesel, Ethanol, Methanol) oder verwendbare biogene Gase (Biomethan, Dimethylether, Wasserstoff) umgewandelt werden (Vogel, 2006).

In Indien und China werden Holzvergaser zur Strom- und Wärmeerzeugung bereits länger erfolgreich eingesetzt (IISc, 2006). In den Industrieländern sind die Umweltauflagen (Luft- und Wasseremissionen) für die Anlagen in der Regel höher angesetzt, weshalb es bisher nur vereinzelt Vergasungsanlagen im kommerziellen Maßstab zur Strom- und Wärmeerzeugung gibt (Vogel, 2007). Dabei handelt es sich jedoch nur um technische Probleme der Gasreinigung, die lösbar und meist nur eine Frage der Kosten sind. Biomassevergasungsanlagen sind der Kernprozess in der Herstellung von synthetischen Biokraftstoffen, die auch Biokraftstoffe der zweiten Generation genannt werden. Vor der Vergasung des Biomasse Rohstoffes muss dieser ggf. zerkleinert und getrocknet werden. Das im Vergasungsprozess gebildete Rohgas wird gereinigt und konditioniert, d.h. es werden Verunreinigungen wie Teere, Partikel oder Schwefelverbindungen entfernt (Reingas) und die für die Kraftstoffsynthese notwendige Gaszusammensetzung eingestellt. Das so gewonnene Synthesegas wird über eine Synthese in den gewünschten Kraftstoff gewandelt. Es gibt verschiedene Synthesen: Die Fischer-Tropsch-Synthese wandelt Synthesegas in ein Fischer-Tropsch-Rohprodukt, dass durch anschließende Aufbereitung zu gebrauchsfertigem Fischer-Tropsch-Diesel-Kraftstoff, welcher oft als BtL-Diesel bezeichnet wird, weiterveredelt wird. Die Methanisierung (Methansynthese) wandelt Synthesegas in Methan und Kohlendioxid. Das CO_2 muss dabei abgetrennt werden und kann eingelagert werden (Kasten 7.2-2). Diese Prozesskette ist energieaufwändig und verlustreich: Die Produktion von Fischer-Tropsch-Diesel (BtL) erfordert den zweifachen Wechsel des Aggregatszustandes der meist festen Biomasse in einen gasförmigen und schließlich flüssigen Energieträger, wobei nur noch ca. die Hälfte der ursprünglichen Bioenergie im Endprodukt BtL-Diesel enthalten ist (Sterner, 2007). Biomethan lässt sich effizienter produzieren, da das Endprodukt gasförmig ist. Das Ausgangsprodukt ist in vielen Fällen holzartige Biomasse wie Hackschnitzel, die jedoch über die direkte Verbrennung zur Strom- und Wärmebereitstellung besser genutzt werden können als zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen über die Vergasung. Diese ist energetisch nur sinnvoll, wenn als Biomasserohstoff eine schwierig zu verarbeitende Biomasse verwendet wird.

Die Entwicklung von Biomassevergasungsanlagen zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen befindet sich in den Vorreiterländern Deutschland, Schweden und Österreich noch im Pilot- und Demonstrationsstatus. Erste kommerzielle Anlagen

entstehen zurzeit, ein volkswirtschaftlich relevanter Beitrag ist frühestens ab 2020 zu erwarten. Besonders erfolgversprechend aus Sicht der Energieausbeute sind hochintegrierte Verfahren, in denen eine ausgereifte Wirbelschichtvergasung zur Polygeneration von Strom, Wärme und Kraftstoff (synthetischem Biomethan) eingesetzt wird (Choren, 2007; Chemrec, 2007; TU Vienna, 2007).

Pyrolyse (Verflüssigung)
Bei der Pyrolyse handelt es sich um die thermische Zersetzung fester Biomasse unter Sauerstoffabschluss, weshalb sie auch Entgasung genannt wird. Ziel ist es, in dem Prozess einen maximalen Anteil an flüssigen Komponenten zu erhalten (Pyrolyseöl). Zusätzlich entstehen feste und gasförmige Nebenprodukte (Pyrolysekoks, Pyrolysegas), die teilweise prozessintern genutzt werden können. Prinzipiell kann gereinigtes und aufbereitetes Pyrolyseöl als Brenn- und Treibstoff in Feuerungsanlagen oder Verbrennungsmotoren, Gasturbinen oder Blockheizkraftwerken eingesetzt werden. Technische Probleme bei der Herstellung und dem Einsatz von Pyrolyseöl und die geringe Wirtschaftlichkeit der Aufbereitung behindern aber bisher einen Durchbruch der Technologie. Der wesentliche Vorteil des Verfahrens besteht in der hohen Energiedichte des Pyrolyseöls. Pyrolyseöl ist ein hervorragendes Energietransportmedium zwischen dezentral anfallenden, weniger energiedichten Stoffen (z.B. Stroh) und zentralen großtechnischen Anlagen (Vergasung zur Kraftstoffherstellung). Dieses Konzept wird besonders am Forschungszentrum Karlsruhe untersucht (FZK, 2007).

7.2.2.2 Physikalisch-chemische Verfahren

Physikalisch-chemische Umwandlungsverfahren pressen bzw. extrahieren energetisch nutzbare Öle und Fette aus bestimmten Bioenergieträgern (z.B. Rapssaat oder *Jatropha*-Pflanzen). Diese pflanzlichen Öle und Fette können direkt in Blockheizkraftwerken effizient zur Strom- und Wärmebereitstellung verwendet werden oder in umgebauten Motoren im Straßenverkehr eingesetzt werden. Mit Hilfe der Umesterung können pflanzliche Öle auch in Biodiesel umgewandelt werden, dessen Eigenschaften weitgehend dem konventionellen Dieselkraftstoff entsprechen. Dadurch wird ein Umbau des Motors überflüssig und die Einsatzbandbreite des biogenen Kraftstoffes erhöht (Abb. 7.2-1; FNR, 2005).

Pressung und Extraktion
Durch einfaches mechanisches Pressen ölhaltiger Pflanzenbestandteile (z.B. der Saat) wird das flüssige Öl von der festen Phase (sog. Presskuchen) getrennt. Der Presskuchen wird meist als Tierfutter verwendet mit Ausnahme von giftigen Pflanzenresten wie z.B. *Jatropha*. Die Presstechnik ist sowohl in kleinem (z.B. in der Landwirtschaft) als auch in großem Maßstab (z.B. Ölpresse) verfügbar. Pflanzenöl wird auch für den Nahrungsmittelsektor mit derselben Technik gewonnen. Nach einer Reinigung lässt sich das Pflanzenöl im mobilen Bereich in speziellen Pflanzenölmotoren einsetzen oder im stationären Bereich in Blockheizkraftwerken.

Alternativ oder zusätzlich zur Pressung kann Öl durch Extraktion mit Hilfe eines Lösungsmittels (z.B. Hexan) vom Bioenergieträger gewonnen werden. Über Destillation werden Öl und Lösemittel voneinander getrennt. Das Lösemittel wird wieder verwendet. Auch dieses Verfahren ist großtechnisch im Einsatz. Pflanzenöl kann aus sehr vielen ölhaltigen Pflanzen gewonnen werden, Beispiele sind *Jatropha* oder Ölpalmen.

Veresterung
Um das Einsatzspektrum für biogene Kraftstoffe zu vergrößern und den Motorumbau für den Einsatz von Pflanzenöl zu umgehen, wird Pflanzenöl in Pflanzenölmethylester (PME oder engl. FAME – Fatty Acid Methyl Ester, allgemein Biodiesel) unter Verlusten von ca. 5–10 % umgewandelt (TUM, 2000). Das Veresterungsverfahren ist großtechnisch im Einsatz. PME kann pur in angepassten und allen neueren Dieselmotoren sowie in bis zu fünfprozentiger Beimischung in allen herkömmlichen Dieselmotoren eingesetzt werden. Nicht nur im Verkehrssektor kann Biodiesel eingesetzt werden, auch in BHKW ist ein Einsatz technisch möglich. Dies ist jedoch systemtechnisch nicht sehr effizient, da Pflanzenöl ohne weiteres auch direkt in BHKW verbrannt werden kann. (FNR, 2005; 2006b).

7.2.2.3 Biochemische Umwandlung

Die Konvertierung der Biomasse in Endenergie erfolgt bei den biochemischen Verfahren mit Hilfe von Mikroorganismen (Abb. 7.2-1; FNR, 2005).

Anaerober Abbau – Vergärung
Unter dem anaeroben Abbauprozess versteht man den Abbau organischer Stoffe unter Ausschluss von Sauerstoff durch die Aktivität bestimmter Bakterien. Das Endprodukt dieses Prozesses ist ein wasserdampfgesättigtes brennbares Mischgas (Biogas), welches im Wesentlichen aus Methan (50–70 %) und Kohlendioxid (25–40 %) besteht (BayLfU, 2004; FNR, 2006a). Der Entstehungsprozess des Biogases

kann in vier Teilschritte unterteilt werden: (1) Hydrolyse, (2) Versäurerungsphase, (3) Essigsäurebildung und (4) Methanogenese.

Bei der Hydrolyse werden die komplexen Verbindungen des Ausgangssubstrats (z.B. Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette) in einfachere Verbindungen (z.B. Aminosäuren, Zucker, Fettsäuren) zerlegt. Die daran beteiligten Bakterien setzen Enzyme ein, die das Material auf biochemischem Weg zersetzen. In der Versäuerungsphase (Acidogenese) werden die bei der Hydrolyse gebildeten Zwischenprodukte durch säurebildende Bakterien weiter zu niederen Fettsäuren (Essig-, Propion- und Buttersäure), Kohlendioxid und Wasserstoff abgebaut. Weitere Produkte in geringen Mengen sind Alkohole und Milchsäure. In der Acetogenese, der Essigsäurebildung, werden diese Produkte durch Bakterien zu Vorläufersubstanzen des Biogases (Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid) umgesetzt. In der abschließenden Methanogenese wird aus den Produkten der Acetogenese das Methan gebildet (FNR, 2006a).

Diese Prozesse laufen in einem oder mehreren Fermentern ab. Damit der Prozess eine hohe Ausbeute hat, muss im Fermenter eine Temperatur von ca. 35–37°C gehalten werden. Die dafür benötigte Wärme kommt meist direkt aus der Abwärme des mit dem Biogas betriebenen Verbrennungsmotors. Die Fermenter sind das Herzstück von konventionellen Biogasanlagen. Vorbelastete Stoffe, beispielsweise Abfälle aus der Lebensmittelindustrie, müssen in einer Hygienisierungsstufe vorbehandelt werden. Nach dem Fermenter wird der Gärrest in geschlossenen Nachfermentern mit Biogasnutzung oder offenen Gärrestbehältern aufbewahrt und in der Regel als Flüssigdünger auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ausgebracht (IE, 2007a). Der aufgebrachte Dünger ist geruchsärmer und nährstoffreicher als unvergorene Gülle. Methan- und Lachgasemissionen aus der Nachvergärung wirken sich negativ auf die Treibhausgasbilanz der Biogasanlagen aus (Methanschlupf). Durch Abdecken des Nachfermenters werden diese Emissionen unterbunden. In Deutschland ist die Abdeckung Pflicht, in anderen Ländern noch keine Vorschrift (Zah et al., 2007). Das gesammelte Biogas kann über eine direkte Verbrennung als Wärme- und Lichtquelle verwendet werden (Einsatz v.a. in Entwicklungsländern) oder in BHKW über eine Verbrennung in Kolbenmotoren oder Mikrogasturbinen zur Strom- und Wärmebereitstellung genutzt werden (Einsatz v.a. in den Industrieländern).

Ein eleganter Prozessschritt ist die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan. Hierbei wird das CO_2 vom Gasstrom abgetrennt und das verbleibende Methan gereinigt und zu Biomethan mit Erdgasqualität aufbereitet. So kann es dezentral in das vorhandene Erdgasnetz eingespeist und zur Strom- und Wärmebereitstellung sowohl in dezentralen Klein-BHKW (Verbrennungsmotor, Brennstoffzelle usw.) als auch in großskaligen Gas- und Dampfkraftwerken verwendet werden (Kasten 7.2-2). In Europa und Deutschland sind in den letzten Jahren sehr viele großtechnische Biogasanlagen entstanden, die als Substrat nicht nur tierische Exkremente, sondern auch nachwachsende Rohstoffe wie etwa Mais verwenden (IE, 2007b).

In weiten Teilen Asiens sind Klein-Biogasanlagen weit verbreitet (FAO, 1992). Seit Jahrzehnten wird diese Technik dort erfolgreich dezentral eingesetzt. Vor allem der geringe Wartungsaufwand (keine mechanisch bewegten Teile, wenig Verschleiß) und eine unkomplizierte Handhabung führten diese Technik zum Erfolg. Eine zusätzliche externe Wärmezufuhr für die Fermenter ist in diesen Breitengraden aufgrund hoher Jahresmitteltemperaturen nicht notwendig. Für einen erfolgreichen Einsatz ist eine kombinierte Land- und Viehwirtschaft notwendig, da beim ausschließlichen Ackerbau kein Dung anfällt und nomadische Viehzüchter ohne Ackerbau den anfallenden Gärrest nicht verwenden können. Die Trennung zwischen Ackerbau und Viehzucht ist in weiten Teilen Afrikas südlich der Sahara üblich. In Asien wird meist eine kombinierte Land- und Viehwirtschaft betrieben, weshalb Biogas dort in ländlichen Regionen sehr gut angenommen wird (SNV, 2008).

Aerober Abbau

Beim aeroben Abbau wird die Biomasse unter Sauerstoffzufuhr mit Hilfe von Bakterien oxidiert. Im Gegensatz zum anaeroben Abbau wird in diesem Prozess Wärme freigesetzt, die über den Einsatz von Wärmepumpen als Niedertemperaturwärme genutzt werden kann. Aufgrund der geringen Wärmenachfrage bei Kompostierungsanlagen und gering verfügbarer Systemtechnik kam diese Nutzung bisher nicht zu einem Durchbruch (FNR, 2005).

Alkoholgärung

Alkohol kann aus verschiedenen zucker-, stärke- oder zellulosehaltigen organischen Stoffen mit Hilfe von Hefen oder Bakterien hergestellt und durch Destillation bzw. Rektifikation rein erhalten werden. Falls stärke- oder zellulosehaltige Substanzen verwendet werden, müssen diese zunächst verzuckert werden. Die Prozesse sind Stand der Technik und seit langem durch die Herstellung von Trinkalkohol großtechnisch etabliert. Bioethanol kann als Treibstoff in Motoren (Automobile, BHKW usw.) verwendet werden und somit zur Energieversorgung in allen Bereichen eingesetzt werden (Strom, Wärme, Verkehr). Immer populärer werden sog. „Flexible Fuel Vehic-

Kasten 7.2-2

Biomethan: ein vielversprechender Bioenergieträger

Die Herstellung von Biomethan ist aus vielen Gründen ein besonders interessanter Pfad. Ausgangsstoff ist entweder Biogas, das aus der Vergärung feuchter Biomasse in sog. Biogasanlagen entsteht, oder Synthesegas aus der Vergasung von überwiegend fester Biomasse.

Biogas setzt sich aus den Hauptbestandteilen Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) und zu sehr geringen Anteilen aus den Verbindungen H_2O, H_2S, NH_3, N_2 und O_2 zusammen. Für die Abtrennung der unerwünschten Bestandteile stehen verschiedene Prozesse wie die Druckwechselabsorption und die Aminwäsche zur Verfügung. Membrantrennverfahren versprechen zwar eine Erhöhung der Effizienz, befinden sich jedoch in Entwicklungsstadium. In Europa sind heute ca. 80 Anlagen zur Aufbereitung von Biogas für die Einspeisung in Erdgasnetze oder für den Einsatz als Erdgassubstitut in Betrieb. Je nach Verfahren werden dabei Reinheiten im Bereich von 96–99 % Methan erreicht.

Synthesegas setzt sich aus anderen Bestandteilen zusammen. Je nach verwendetem Vergasungsprozess bilden dabei Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2) als Hauptbestandteile, während Methan (CH_4) und Wasserdampf nur in geringen Konzentrationen vorkommen. Dieses Gemisch wird in sog. Synthesereaktoren zu Methan und Kohlendioxid konvertiert und das Kohlendioxid abgetrennt. Der Prozess der Konversion von Synthesegas zu Methan und der Prozess der Kohlendioxidabtrennung wird großtechnisch beherrscht und beide Prozesse seit über 20 Jahren erfolgreich eingesetzt (IPCC, 2005). Im Gegensatz zur direkten Nutzung des Bio- bzw. Synthesegases in dezentralen Stromerzeugungsanlagen mit denen nur teilweise eine sinnvolle Abwärmenutzung möglich ist, kann durch die Einspeisung des Biomethans in Erdgasnetze eine flexiblere Nutzung erreicht werden. So lässt sich Biomethan über das Erdgasnetz den Nutzern zuführen, denen eine optimale Abwärmenutzung bei der KWK möglich ist. Andererseits kann das Erdgasnetz auch eine Sammelfunktion ausüben und die Biomethan Produktion vieler Anlagen der höchsteffizienten Nutzung in großen GuD-Anlagen zuführen.

Generell kann bei Verwendung von Biomethan die gesamte für Erdgas entwickelte Struktur (Gasnetz, Gas- und Dampfkraftwerke, Gasmotoren, Gasturbinen, Erdgasfahrzeuge) verwendet werden.

Das in jedem Fall bei der Gasaufbereitung anfallende CO_2 kann zumindest bei größeren Anlagen aufgefangen und deponiert werden. Dann verbessert sich die Klimaschutzwirkung der Bioenergienutzung um ca. 20 %. Die Technologie zur Deponierung des CO_2 befindet sich derzeit in der Entwicklung. Der WBGU hat an anderer Stelle zu den Anforderungen an die Nachhaltigkeit von CO_2-Sequestrierung Stellung genommen (WBGU, 2006).

Kritisch ist die bei der Gasaufbereitung entstehende Emissionen von Methan zu sehen. Diese liegen zwar im Bereich weniger Prozentanteile, führen jedoch wegen der hohen Klimaschädlichkeit des Methans zu spürbaren Reduktionen der Klimaschutzwirkung bei der Biomethanerzeugung und –nutzung. Es muss das Ziel zukünftiger Entwicklungen sein, diese Leckagen drastisch zu reduzieren.

les“ mit E85-Motoren, die Ottokraftstoffmischungen mit bis zu 85 % Ethanol verbrennen können und von immer mehr Automobilherstellern serienmäßig gebaut werden (FNR, 2005). Eine synthetische Ethanolherstellung aus lignozellulosehaltigen Stoffen über einen mikrobiologischen Fermentationsprozess ist bislang nicht über den Pilotmaßstab hinausgekommen (Igelspacher et al., 2006). Eine Ethanolherstellung basierend auf Lignozellulose über den Weg der Vergasung ist theoretisch auch möglich (Abengoa, 2006; Sterner, 2007).

7.2.3 Effizienz verschiedener moderner Konversionsverfahren

Im Folgenden werden diese Verfahren eingebettet in ausgewählte Nutzungspfade von Bioenergie nach technischen und ökonomischen Parametern bewertet. Das robusteste und wichtigste technische Kriterium in der Technologiebewertung allgemein und zur Bewertung eines Nutzungspfades ist der Wirkungsgrad. Für das vorliegende WBGU-Gutachten wurden Expertisen beim deutschen Biomasseforschungszentrum Leipzig (Müller-Langer et al., 2008) und beim Öko-Institut (Fritsche und Wiegmann, 2008) in Auftrag gegeben, in denen Daten für ausgewählte Konversionspfade zusammengestellt wurden. Auf Basis dieser Daten wurde der Wirkungsgrad nach der VDI Norm 4661 berechnet. Zunächst wird eine Übersicht über die untersuchten Bioenergienutzungspfade gegeben.

7.2.3.1 Übersicht der untersuchten Bioenergienutzungspfade

Bei der Auswahl der Bioenergienutzungspfade wurden derzeit marktwirtschaftlich relevante Pfade einbezogen und zusätzlich solche Nutzungsformen aufgenommen, die der WBGU aus ökologischer und technischer Sicht vom Anbau/Gewinnung bis zur Endenergienutzung zukünftig als besonders betrachtenswert erachtete. Ein wesentliches Selektionskriterium war die Datenverfügbarkeit. Aus über 120 Pfaden wurden unter diesen Kriterien insgesamt 66 ausgewählt und analysiert, davon 25 im Bereich Mobilität (Biokraftstoffe und Elektromobilität), 4 Wärme-Pfade und 37 Nutzungspfade im Bereich Strom- und Wärmeerzeugung (Kraft-Wärme-Kopplung, KWK). In allen Pfaden ist der Bezugspunkt die Bioenergienutzung in Deutschland, ebenso bei

der Gewinnung der Reststoffe und dem Anbau der temperaten Energiepflanzen. Als Ursprungsländer der tropischen Pflanzen wurden Brasilien (Zuckerrohr), Indonesien (Ölpalme) und Indien (*Jatropha*) gewählt (Tab. 7.2-1).

Untersuchte Anbausysteme und Reststoffe

Verschiedene Anbausysteme wurden als Vorkette für die technischen Konversionsverfahren gewählt. Darunter sind weit verbreitete Systeme wie der Anbau von Mais, Raps und Zuckerrohr, aber auch der Anbau von C4-Gräsern (Rutenhirse), die eine dauerhafte Bedeckung der Fläche gewährleisten und mehrjährig kultiviert werden oder *Jatropha*, das auch auf degradiertem Land angebaut werden kann. Auch die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen wurde einbezogen. Für die temperaten Energiepflanzen wurde sowohl der Anbau auf solchen Flächen betrachtet, die vorher als Acker genutzt wurden als auch für Grasland (Fritsche und Wiegmann, 2008). Im Folgenden werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die Ergebnisse für den Anbau auf Acker dargestellt. Die Unterschiede, die sich durch die Umnutzung von Grasland ergeben, werden in Kapitel 7.3 diskutiert. Die untersuchten Anbausysteme und Reststoffe, die in den Kapiteln 7.2 und 7.3 analysiert wurden, sind in Tabelle 7.2-1 aufgeführt.

Untersuchte technische Konversionsverfahren

In der ersten Konversionsstufe (Biomasse zu Bioenergieträger) wurden neben konventionellen Verfahren zusätzlich Pfade ausgewählt, die die Verfahren Vergärung oder Vergasung beinhalten, da diese aus Sicht des WBGU eine vielversprechende Zukunftsoption sind (Kasten 7.2-2 „Biomethan“).

In der anschließenden Konversionsstufe (Bioenergieträger zu Energiedienstleistung, Produktwandlung) wurden im Verkehr neben dem konventionellen Antriebskonzept mittels Verbrennungsmotor auch Pfade mit Elektromobilität untersucht. In der Stromerzeugung wurde aufgrund der höheren Brennstoffausnutzung und Gesamteffizienz der Energienutzung der Schwerpunkt auf die Kraft-Wärme-Kopplung gelegt – zentral sowie dezentral mit bestehenden Technologien wie Blockheizkraftwerken (BHKW), großen Gas- und Dampfkraftwerken (GuD) und Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC). Ein Teil der untersuchten Konversionspfade reflektiert den gegenwärtigen Stand der Technik (2005), andere beziehen sich auf das Jahr 2030, d.h. es wird eine Neu- bzw. Weiterentwicklung der Technologien erwartet. Alle Konversionspfade sind in Tabelle 7.2-2 aufgeführt.

Auswirkung des Skaleneffekts der Technologien auf Wirkungsgrade, Gestehungskosten, THG-Vermeidungskosten und THG-Vermeidungsleistung

Für die Analyse wurden jeweils exemplarische Anlagen mit vorgegebener Leistungsgröße verwendet. Die Anlagengröße hat einen entscheidenden Einfluss auf die Wirkungsgrade. Je größer die Anlage, desto effizienter ist sie in der Regel. Dies kommt besonders bei den Mobilitätspfaden zum Tragen, wo sich die Anlagengrößen um den Faktor 300 unterscheiden: Die kleinste Anlage (Biogas für Elektromobilität) ist 1,6 MW groß (ca. 0,4 t Biomasseinput pro Stunde), die größte (Fischer-Tropsch-Diesel) hat 535 MW (ca. 140 t Biomasseinput pro Stunde). Die Anlagengröße wirkt sich dadurch auf die Treibhausgasvermeidungspotenziale und die Gestehungskosten und damit auch auf die Treibhausgasvermeidungskosten aus (Kap. 7.3 und 7.4). Kleine Anlagen schneiden hierbei in der Regel schlechter ab, große besser.

7.2.3.2 Wirkungsgrade

Die Nennwirkungsgrade verschiedener Bioenergienutzungspfade werden im Folgenden für die Bereiche Mobilität, Strom und Wärme gegenübergestellt. Wirkungsgrade setzen abgehende Zielenergieströme (Strom, Wärme, Kraft) mit den in einer Anlage aufgewandten Energieströmen (Biomasse-Rohstoff, Hilfsenergien) ins Verhältnis. Zur Berechnung dieses technischen Parameters verwendet der WBGU die Nennwirkungsgradmethode nach der VDI-Norm 4661, die in Kasten 7.2-3 näher erläutert wird. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass sie etabliert und anerkannt ist und dadurch direkte Vergleiche mit anderen Studien möglich sind. Außerdem kann durch eine exergetische Bewertung in den Berechnungen der Wärmebereitstellung zwischen Exergie und Energie unterschieden werden und auf Basis des mechanischen bzw. elektrischen Äquivalents der Wärmeenergie die drei Bereiche Mobilität, Strom und Wärme sektorenübergreifend verglichen werden. In vielen Publikationen wird der Wirkungsgrad zur Bereitstellung von einer thermischen Energieeinheit Wärme mit einer chemischen Energieeinheit Kraftstoff oder elektrischen Energieeinheit Strom gleichgesetzt. Alle drei Größen sind jedoch von unterschiedlicher energetischer Natur und können nur unter Berücksichtigung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik sinnvoll miteinander verglichen und bewertet werden, wie in Kasten 7.2-3 aufgezeigt wird. Werden jedoch Vergleiche innerhalb des Wärmesektors gezogen, ist die thermische Energie als Nutzenergie relevant.

Tabelle 7.2-1
Auswahl verschiedener Anbausysteme, die vom WBGU untersucht wurden.
Quelle: WBGU

Anbausystem, Rohstoff	Vorherige Landnutzung und Herkunft des Rohstoffes	Bezeichnung in Settings
Tropische Monokulturen		
Zuckerrohr	Degradiertes Land (Brasilien)*	Zuckerrohr (degradiert)
	Acker (Brasilien)	Zuckerrohr
Ölpalme	Tropischer Regenwald (Indonesien)*	Ölpalme (Regenwald)
	Degradiertes Land (Indonesien)*	Ölpalme (degradiert)
Jatropha	Acker (Indien)	*Jatropha*
	Acker (Indien)	*Jatropha*
Temperate Monokulturen		
Mais, Maissilage	Acker (Deutschland)	Mais, Maissilage
Getreide, Weizen	Acker (D)	Getreide
Raps	Acker (D)	Raps
Hirse, Rutenhirse	Acker (D)	Rutenhirse
Kurzumtriebsplantagen (Schnellwachsende Baumsorten)		
Pappel / Weide	Acker (D)	KUP
Temperates Grasland		
Gras, Grassilage	Wiese (D)*	Gras, Grassilage
Reststoffe und Abfälle		
Ernterückstände / Exkremente	-	Ernterückstände/Gülle
Restholz	-	Restholz
Stroh	-	Stroh
Speisefett, Tierfett, Altfett	-	Altfett
Bioabfall, Biomüll	-	BioAbfall
Mischung aus Energiepflanzen und Reststoffen		
Grassilage (70 %), Gülle (30 %)	Wiese (D)*	Grassilage/Gülle

* in diesen Anbausystemen wurden keine THG-Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen angesetzt, da es derzeit in Deutschland aufgrund der sich ändernden Milchquoten und der zunehmenden Fütterung von Rindern mit hochwertigem Ackerfutter Grünland gibt, für das eine Nutzung gesucht wird, weshalb sich eine Nutzung von Gras und Gülle als Substrat in Biogasanlagen anbietet. Dies ist allerdings ein durch die derzeitige Marktlage bedingter spezifisch deutscher bzw. europäischer Sonderfall und kann nicht auf andere Regionen übertragen werden, so dass Umnutzung von Grasland andernorts indirekte Landnutzungsänderungen auslösen kann.

Vergleich der Wirkungsgrade der Strom- und Wärmeerzeugung aus Bioenergie

Aus dem Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung wurden 36 Nutzungspfade untersucht und ein Pfad zur reinen Stromerzeugung durch Mitfeuerung von Biomasse in einem Steinkohlekraftwerk. Energetisch betrachtet lässt sich durch die direkte Verbrennung holzartiger Biomasse im Heizkraftwerk oder deren Vergasung und direkte Nutzung in Gasturbinen die meiste Energie aus Biomasse, insbesondere holzartiger Biomasse gewinnen. Ebenfalls energetisch effizient ist die Nutzung von Rapsöl in BHKW oder von Mais und Rutenhirse in Biogasanlagen. Rein exergetisch betrachtet sind die Unterschiede weniger signifikant und der Mittelwert des exergetischen Wirkungsgrades liegt bei ca. 30 %, wobei jedoch die Mitverbrennung von Biomasse im Kohlekraftwerk sowie die Verwendung von Brennstoffzellen oder der Einsatz von Rapsöl in BHKW am effizientesten sind. Insgesamt weisen Festoxid-Brennstoffzellen sehr hohe elektrische Wirkungsgrade auf, was ein Vorteil dieser Technologie ist.

Wird die Nutzung verschiedener Rohstoffe unter Einsatz derselben Technologie etwa am Beispiel der Biomethan-GuD-Pfade verglichen, zeigt sich, dass holzartige Biomasse wie KUP und Restholz sowie Gräser wie Rutenhirse effizienter gewandelt werden können als etwa Bioabfall oder Ernterückstände.

Tabelle 7.2-2
Auswahl verschiedener technischer Konversionsverfahren.
Quelle: WBGU

Bezeichnung in Settings	Konversionsschritte	Produktwandlung	Leistungsgröße der Anlage (Biomasse-Input in MW) (Therm. Feuerungsleistung)
Mobilität			
Ethanol–PKW Bioethanol	Alkoholische Fermentation, Absolutierung	Ottomotor / Flexible-Fuel-Vehicle	Mais – 192 MW Zuckerrohr – 319 MW Getreide – 229 MW Stroh – 378 MW
Biodiesel-PKW Biodiesel	Extraktion, Umesterung	Dieselmotor	Rapskörner – 175 MW Ölpalme – 298 MW *Jatropha* – 291 MW Altöl – 61 MW
Pflanzenöl-PKW Pflanzenöl	Extraktion	Dieselmotor (angepasst)	Rapskörner – 2,9 MW
Biomethan-PKW (1. Gen.)	Anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	Gas-Ottomotor	Mais – 3,2 MW Gülle / Ernterückst. – 5,0 MW Grassilage/Gülle – 3,8 MW Bioabfall – 3,9 MW
Biomethan-PKW (2. Gen.)	Vergasung, Methanisierung	Gas-Ottomotor	KUP – 39 MW Restholz – 39 MW
Fischer-Tropsch -BTL-Diesel (Biomass-to-Liquid)	Flugstromvergasung, Fischer-Tropsch Synthese Upgrading	Dieselmotor	KUP – 518 MW Restholz – 518 MW Stroh – 536 MW
Wasserstoff-PKW (Bio-Hydrogen)	Vergasung, Gasreinigung	Brennstoffzelle (H2)	Restholz – 250 MW
Biogas-BHKW-elektroPKW Biogasstrom	Anaerobe Vergärung, Verbrennung in BHKW zur Strom u. Wärmeerzeugung	Elektromotor	Hirse – 1,6 MW Gülle / Ernterückst. – 2,5 MW
Wärme			
Pellet-Kleinfeuerung	Pelletierung	Kleinfeuerungsanlage (Pelletheizung)	Hirse – 0,017 MW KUP – 0,015 MW Restholz – 0,016 MW Stroh – 0,019 MW
Strom und Wärme – Kraft-Wärme-Kopplung (nur Strom bei (Stein)Kohle-Kraftwerken)			
Biogas-BHKW (Block-Heizkraftwerk)	Anaerobe Vergärung	Dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)	Mais – 1,6 MW Hirse – 1,6 MW Gülle/Ernterückstände – 2,5 MW Grassilage/Gülle – 1,9 MW BioAbfall – 3,9 MW
Biomethan-BHKW	Anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	Dezentrales BHKW (Gas-Ottomotor)	Mais – 3,2 MW Hirse – 3,1 MW Gülle/Ernterückstände – 5,0 MW Grassilage/Gülle – 3,8 MW BioAbfall – 3,9 MW
Biogas-SOFC Festoxid-Brennstoffzelle	Anaerobe Vergärung	Festoxid-Brennstoffzelle	Mais – 1,6 MW Hirse – 1,6 MW Gülle/Ernterückstände – 2,5 MW Grassilage/Gülle – 1,9 MW BioAbfall – 3,9 MW
Biomethan-GuD Gas-und-Dampfkraftwerk	Anaerobe Vergärung, Gasaufbereitung	Zentrales GuD-Kraftwerk	Mais – 3,2 MW Hirse – 3,1 MW

***Fortsetzung* Tabelle 7.2-2**
Auswahl verschiedener technischer Konversionsverfahren.

Pflanzenöl-BHKW	Extraktion, (Umesterung)	Dezentrales BHKW (Dieselmotor)	Raps – 2,9 MW Ölpalme – 3,9 MW *Jatropha* – 3,7 MW
Pellet-Kohle-KW	Pelletierung, Mitverbrennung	Zentrales Steinkohlekraftwerk	KUP – 100 MW Restholz – 103 MW Stroh – 144 MW
Hackschn-HeizKW-Dampf-Turb Hackschnitzel	Verbrennung	Zentrales Heizkraftwerk Dampfturbine	KUP – 22 MW Restholz – 22 MW Stroh – 22 MW
Rohgas-GasTurb	Wirbelschichtvergasung	Gasturbine	KUP – 90 MW Restholz – 90 MW
Rohgas-BrennstZelle	Wirbelschichtvergasung	Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC)	KUP – 18 MW Restholz – 18 MW

Vergleich Wirkungsgrade der Wärmeerzeugung aus Bioenergie

Die Verwendung verschiedener Rohstoffe für die Wärmeerzeugung wurde exemplarisch an einer Kleinfeuerungsanlage (Pelletheizung) mit einer Leistung von 15 kW analysiert. Der exergetische Wirkungsgrad liegt für die untersuchten Wärmepfade in einer Bandbreite von 15–20 % und damit über den meisten der betrachteten Mobilitätspfade. Aus Abbildung 7.2-3 wird deutlich, dass die Nutzung von KUP und Restholz effizienter ist als die Nutzung von Rutenhirse und Stroh, da bei halmartiger Biomasse aufgrund der geringeren Energiedichten der relative Energieaufwand zur Pelletierung größer ist als bei holzartiger Biomasse. Den hier betrachteten Pfaden zur reinen Wärmebereitstellung ist jedoch die Wärmebereitstellung durch Kraft-Wärme-Kopplung in Bezug auf den exergetischen Wirkungsgrad überlegen.

Vergleich der Wirkungsgrade der Mobilitätspfade

Für die Nutzung von Biomasse im Verkehrssektor sind in Abbildung 7.2-3 u. a. die Wirkungsgrade von 25 Bioenergienutzungspfaden für Mobilität gegenübergestellt, die sich in der Kraftstoffbereitstellung und in der verwendeten Automobiltechnik unterscheiden (vgl. Kennwerte der Kraftfahrzeuge in Tabelle 7.3-2). Durch den Bezug auf den mechanischen Antrieb des Fahrzeuges als Zielenergie können Biokraftstoffe der ersten und zweiten Generation mit der Elektromobilität unter Verwendung von Biomasse verglichen werden.

Bei der Verwendung von Bioenergie in der Mobilität weist der Einsatz von biogenem Strom in der Elektromobilität besondere Vorzüge gegenüber Biokraftstoffen in konventionellen Verbrennungsmotoren auf: der exergetische Wirkungsgrad der Pfade ist nahezu doppelt so hoch wie bei den konventionellen Biokraftstoffen in Verbrennungsmotoren. Die Ursache dafür liegt zum einem in der effizienten Stromproduktion und der Verwendung in modernen Elektro-PKWs und zum anderen in der effizienten Nutzung des Rohstoffs Biomasse, da in der stationären Energiewandlung die Abwärme des Verbrennungsprozesses genutzt werden kann, in der mobilen Anwendung nicht (Kap. 8.1). Der Vergleich zeigt darüber hinaus, dass die Verwendung von Biokraftstoffen der zweiten Generation nicht generell effizienter ist als die der ersten Generation. Die Herstellung und Nutzung von Ethanol mit einem Wirkungsgrad von maximal 11 % ist wenig effizient. Höhere Wirkungsgrade erzielen einige Biodieselpfade, die allerdings nicht die Ganzpflanze als Bezugsgröße haben, sondern beispielsweise nur Pflanzenteile wie Rapssamen oder *Jatropha*-Nüsse. Eine Ausnahme stellt auch Altfett als Rohstoff dar, welches sehr effizient in Biodiesel gewandelt werden kann, da Altfett ein bereits gewandeltes Pflanzenprodukt ist und dieser Konversionsschritt nicht einberechnet wird.

Bei der Herstellung von Fischer-Tropsch-Diesel (BtL) kann zusätzlich eine geringe Menge Strom bereitgestellt werden. Obwohl es sich bei den drei betrachteten theoretischen BtL-Konzepten um eine sehr große Anlagengröße mit ca. 500 MW thermischer Feuerungsleistung handelt, ist der Wirkungsgrad der BtL-Herstellung und Nutzung mit einer Bandbreite von 14 % bis 16 % vergleichbar mit anderen Mobilitätspfaden, denen weit kleinskaligere Anlagen zugrunde liegen. Im Bereich Biomethan zeigen KUP und Restholz die höchsten Wirkungsgrade, da in der Vergasung von diesen Rohstoffen Kraftstoff, Strom und Wärme im sog. Polygeneration-Konzept bereitgestellt werden kann (Fürnsinn, 2007). Die Vergasung von Restholz zu Wasserstoff bei einer Anlagengröße von 250 MW thermischer Feuerungsleistung

und dessen Einsatz in modernen Brennstoffzellen-Fahrzeugen ist kaum effizienter als konventionelle Biokraftstoffe in Verbrennungsmotoren.

Die Anlagengröße hat besonders in den untersuchten Mobilitätspfaden deutliche Auswirkungen auf die Wirkungsgrade. Für die Stromerzeugung zur Nutzung bei der Elektromobilität wurde beispielsweise mit 1,6 MW nur eine relativ kleine Leistungsklasse betrachtet. Wird Biomasse in größeren Kraftwerken verstromt und auch hier die Abwärme sinnvoll genutzt, liegt die Effizienz des Elektromobilitätspfades noch höher als dargestellt.

Die Hauptursache für die sehr geringen Wirkungsgrade, die mit Ausnahme der Elektromobilität erzielt werden, liegt im schlechten Wirkungsgrad der Verbrennungsmotoren und an der Tatsache, dass die dabei anfallende Abwärme im Gegensatz zu stationären Anwendungen nicht genutzt werden kann (s. Tab. 7.2-3).

Vergleichende Bewertung

Insgesamt zeigt sich, dass sich bei der reinen Wärmebereitstellung zwar die höchsten energetischen Wirkungsgrade erzielen lassen, die Exergie, also das mechanische bzw. elektrische Äquivalent dieser Wärme jedoch deutlich unter den Werten der Kraft-Wärmekopplung oder auch unter den Werten der reinen Stromerzeugung im Kraftwerk liegt. Es wird deutlich, dass in der exergetischen Betrachtung die Stromerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung effizienter ist als die reine Wärmebereitstellung.

Die geringste exergetische Wertigkeit wird beim Einsatz von Biokraftstoffen in Kraftfahrzeug-Verbrennungsmotoren erreicht, die in den meisten Fällen nur etwa dem halben Äquivalent der Verbrennung für die reine Wärmeerzeugung oder gar einen Drittel der erreichbaren Werte bei der KWK-Kraftwerk bzw. der reinen Stromerzeugung entspricht. Eine effizientere Nutzung als im Verkehr ist durch die Nutzung von Biokraftstoffen erreichbar, wenn sie in der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung verwendet werden wie beispielsweise Bioethanol in GuD-Kraftwerken oder Pflanzenöl in BHKW. Eine Ausnahme stellt die Elektromobilität dar, bei der nicht nur die Konversion in die Antriebsenergie effizienter ist, als beim Verbrennungsmotor, sondern auch deshalb, weil zusätzlich ein exergetischer Anteil aus der Abwärme bei der KWK entsteht. Darüber hinaus ist die Elektromobilität eine Anwendung des bereitgestellten Stroms und somit in der Darstellung nur innerhalb der Mobilitätspfade, jedoch nicht mit den Strompfaden zu vergleichen.

Ein voller sektorenübergreifender Vergleich ist nur auf Basis der Exergie möglich, wobei die Kraft-Wärme-Kopplung und Verstromung von Biomasse die zu bevorzugende Option ist, um den knappen Rohstoff Biomasse technisch effizient zu nutzen.

Die Verwendung von Bioenergie ist abhängig von der Nachfrage in den jeweiligen Sektoren und dem je nach Land unterschiedlichen Energiesystem. Aus Sicht der technischen Effizienz und der exergetischen Bewertung ist klar die KWK und reine Stromerzeugung zu bevorzugen. Falls jedoch beispielsweise der Strombedarf zukünftig durch andere erneuerbare Energien gedeckt ist, ist auch in Einzelfällen die Biomassenutzung in reinen Wärmeanwendungen wie Pelletheizungen oder Hackschnitzelheizwerken vorstellbar.

Beim Vergleich von Pfaden, die ähnliche technische Konversionsverfahren haben, sich aber durch die eingesetzte Biomasse unterscheiden, zeigen sich keine systematischen Unterschiede zwischen Reststoffen und Energiepflanzen. Tendenziell schwanken die Werte der Reststoffe stärker, was am Vergleich der Pfade mit Restholz, Altfett, Ernterückstände/Gülle und Bioabfall deutlich wird.

7.2.3 Effizienz verschiedener traditioneller Konversionsverfahren

Traditionelle Biomassenutzung findet vorwiegend in Entwicklungsländern statt. Für die Bereiche Mobilität und Stromerzeugung gelten sehr ähnliche Wirkungsgrade wie in Industrieländern, weshalb sie hier nicht weiter spezifisch erläutert werden. Der interessante Bereich der Bioenergienutzung in den Entwicklungsländern aus Sicht der Effizienz sind dagegen die Wärmeanwendungen, besonders die Wärmebereitstellung zum Kochen.

Holzherde

Der global größte Verbrauch von Biomasse findet in Entwicklungsländern zum Kochen, Heizen und Beleuchten statt. Traditionell wird mit gesammeltem Feuerholz auf dem Drei-Steine-Herd gekocht, der wegen der schlechten Verbrennung und Wärmenutzung nur einen Wirkungsgrad von 5–15 % besitzt (Mande und Kishore, 2007). Weit verbreitet ist auch die Holzkohleherstellung und -nutzung, die eine Gesamteffizienz von nur 4 % aufweist, jedoch besonders in den wachsenden urbanen Zentren aufgrund der hohen Energiedichte und des einfachen Transportes der Holzkohle eine hohe Verbreitung hat. Die geringe Effizienz ergibt sich einerseits aus der Holzkohleherstellung mit einem Wirkungsgrad von ca. 18 % und andererseits dem Herd selbst mit einem Wirkungsgrad von 23 %. Holz- und Holzkohleherde stellen den überwiegenden Teil der Wärmequellen in Entwicklungsländern. Kerosin- und Elek-

Kasten 7.2-3

Methodik, Bilanzgrenzen und Berechnung der Nennwirkungsgradmethode

Im Folgenden wird die Methode zur Berechnung des Nennwirkungsgrades von Bioenergiepfaden nach VDI 4661 vorgestellt. Diese Methode ist aus Sicht des WBGU besonders geeignet um sektorenübergreifend die Verwendung von Biomasse in Verkehr, Wärme und Strom zu vergleichen.

Der Wirkungsgrad eines Systems ist definiert als Quotient aus der nutzbaren abgegebenen Leistung (Nutzen) und der zugeführten Leistung (Aufwand) (VDI 4661, 2003; VDI 3986, 2000). Die Definition von Nutzen und Aufwand ist jeweils abhängig von der Anwendung und Versorgungsaufgabe (Stiens, 2000). Die Zielenergie ist die gewünschte Energieform eines Konversionsprozesses. Als Zielenergien definiert der WBGU mechanische und elektrische Energie sowie thermische Energie in Form von Nutzwärme. Der Nutzen einer Energiebereitstellung aus Biomasse wird demnach als Strom, Wärme und Antrieb eines Fahrzeugs gesehen. Der Kernprozess in allen Konversionsverfahren von Bioenergie ist die Verbrennung des Bioenergieträgers. Alle Prozesse werden daher einschließlich dieses Kernprozesses bilanziert und auf Basis der Zielenergie miteinander verglichen.

In manchen Konversionsprozessen wird nicht nur eine Zielenergie bereitgestellt, sondern zusätzlich weitere Energieformen. In der Kraft-Wärme-Kopplung wird die Erzeugung von Kraft bzw. Strom mit der Erzeugung von Wärme gekoppelt. In der Polygeneration, der Kraft-Wärme-Kraftstoff-Kopplung oder Kraft-Kälte-Kraftstoff-Kopplung wird der Rohstoff Biomasse in drei Zielenergien gewandelt: Strom bzw. Kraft, Kraftstoff und Wärme bzw. Kälte. Alle drei Zielenergien werden als Nutzen im Wirkungsgrad eingerechnet (Gleichung 7.2-1).

Neben diesen Energieformen gibt es Nebenprodukte, die nicht in Form der Zielenergie vorliegen aber einen energetischen Wert haben. Diese müssen dann nicht durch andere Prozesse erstellt werden, da sie als Nebenprodukte anfallen und können daher den Aufwand reduzieren bzw. herzustellende Produkte substituieren. Sie werden folglich energetisch vom Aufwand, bzw. der eingesetzten Biomasse abgezogen. Hierzu zählen Glycerin (3-wertiger Alkohol), Naphtha (Roh-Benzin), Presskuchen, Dried Distillers Grain with Solubles (DDGS) aus der Ethanolproduktion und Extraktionsschrot aus der Rapssaatpressung. Teilweise müssen die Nebenprodukte noch aufbereitet werden (z.B. Trocknung), bevor sie energetisch genutzt werden können. Deshalb werden nicht alle Reststoffe energetisch zu 100 % gewertet. Einige Nebenprodukte werden fast ausschließlich stofflich genutzt (vorwiegend als Futtermittel oder Dünger) wie beispielsweise Gärreste, Extraktionsschrot, DDGS und werden daher in der verwendeten Methode nur mit 50 % als Reduktion des Aufwandes zur Bioenergiebereitstellung angerechnet. Bei anderen Nebenprodukten wie Glycerin oder Naphtha handelt es sich um flüssige Energieträger, die zwar auch vorwiegend stofflich genutzt werden, jedoch direkt zu 100 % ohne Aufbereitung thermisch genutzt werden können und daher auch so gewertet werden. Glycerin kann sehr gut als Kosubstrat in Biogasanlagen mit hohen Methanausbeuten vergoren werden. Eine Ausnahme bildet die bei der Ethanolherstellung aus Zuckerrohr anfallende Bagasse. Diese wird für gewöhnlich zur Stromerzeugung verbrannt nachdem sie getrocknet wurde. Bagasse wird daher als Reduktion des Aufwands mit 80 % angerechnet.

Hilfsenergie wird über die gesamte Nutzungskette vom Anbau bis zur Zielenergie immer zum Aufwand hinzugerechnet. Beispielsweise wird der Maschineneinsatz zur Feldbestellung ebenso als Hilfsenergie in die Bilanzgrenzen einbezogen wie auch der Energieaufwand zum Transport der Biomasse und die in den Konversionsprozessen notwendige Energie in Form von Strom und Wärme. Thermische und elektrische Hilfsenergie kann in einem Energiewandlungsverfahren auch vom Nutzen abgezogen werden, allerdings nur, wenn es sich um die gleiche Energieform handelt (VDI 3986, 2000). Demnach wird der Strombedarf der Konversionsanlage vom produzierten Strom, d.h. dem Nutzen abgezogen (Nettostromproduktion). In der Praxis wird dies in Deutschland aus wirtschaftlichen Gründen jedoch nicht immer so gehandhabt, da regenerativer Strom aufgrund des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes zu einem höheren Preis verkauft werden kann als konventioneller Strom bezogen wird. Die thermische Hilfsenergie kann nur dann von der produzierten Wärme abgezogen werden, wenn sie in den Energiewandlungsprozess integriert wird. In vielen Fällen ist das Temperaturniveau der Ausgangswärme deutlich niedriger als das der benötigten Prozesswärme. In der thermischen Kraftwerkstechnik ist es daher üblich, die thermische Hilfsenergie zum Aufwand zu rechnen (Bolhár-Nordenkampf, 2004; Strauß, 2006). In der Methode werden alle Formen der Hilfsenergie zum Aufwand gezählt mit Ausnahme der elektrischen Hilfsenergie, wenn in der Anlage selbst Strom erzeugt wird. Folglich wird die elektrische Hilfsenergie, wenn sie die Stromproduktion der Anlage nicht übersteigt, vom Nutzen ‚Strom' abgezogen. Wenn der Strombedarf die Stromproduktion der Anlage übersteigt, zählt dieser zum Aufwand.

Definition der Bilanzgrenzen und der Berechung des Wirkungsgrades

Die Bilanzgrenzen (Abb. 7.2-2) der ausgewählten Bioenergiebereitstellungsketten (Pfade) umfassen den Rohstoffanbau bzw. die Bereitstellung der Reststoffe, den Rohstofftransport, die Wandlung in verschiedenen Konversionsschritten zum Produkt „Kraftstoff" (Biodiesel, Bioethanol, Biostrom), den Produkttransport und die Produktwandlung zur Ziel- bzw. Nutzenergie Wärme, Strom und Kraft (mechanische Energie am Rad des Fahrzeuges). Koppelprodukte und Hilfsenergien werden wie oben beschrieben integriert.

Der Wirkungsgrad wird nach VDI 4661 zur Bewertung der Bioenergiepfade wie folgt definiert:

$$\eta = \frac{P_{ab}\,(\text{Nutzen})}{P_{zu}\,(\text{Aufwand})} = \frac{P_{Strom_netto} + P_{Kraft} + P_{Wärme} \cdot \eta_{Carnot}}{P_{Biomasse} + P_{HE_Anbau} + \Sigma\, P_{HE_Trans.} + P_{HE_term.} + P_{HE_elektr.} - P_{Nebenprod.}}$$

Gleichung 7.2-1
Berechnung des exergetischen und energetischen Wirkungsgrades. Beim exergetischen Wirkungsgrad wird die Wärme über den Carnot-Wirkungsgrad bewertet und beim energetischen Wirkungsgrad geht die Wärmeleistung ohne temperaturabhängige Wertung in die Berechnung ein.
.

Abbildung 7.2-2
Bilanzgrenzen zur Wirkungsgradberechnung. Alle Energieflüsse, die entlang der Bereitstellungskette von Bioenergie auftreten, werden in die Bilanzierung miteinbezogen. Dies umfasst die Hauptenergieströme Biomasse Rohstoff als Input und elektrische, mechanische und thermische Energie als Output als auch alle Hilfsenergieströme im Anbau, dem Transport und der Wandlung der Biomasse bzw. des Bioenergieträgers und eventuell anfallende Koppelprodukte wie Naphtha, Presskuchen, Bagasse, Glycerin usw.
Quelle: WBGU

Für das vorliegende Gutachten und in Müller-Langer et al., 2008 wurde als Energieaufwand für den Transport des Rohstoffes Biomasse eine Distanz von 50 km angesetzt und für die Produktverteilung (vorwiegend Biokraftstoffe) eine Distanz von 300 km zugrunde gelegt. Ferner wird eine Auslastung der Anlagen von 7000 h pro Jahr bzw. bei Mitverbrennung von Biomasse in Steinkohlekraftwerken von 5000 h pro Jahr angenommen. Als Datengrundlage für alle Wirkungsgradberechnungen wird Müller-Langer et al., 2008 verwendet.

Exergetische Wertung von Wärme

Ein direkter Vergleich der Wärmeenergie mit elektrischer bzw. mechanischer Energie führt zu falschen Schlussfolgerungen, da sich diese Energieformen nicht eins zu eins in die jeweils anderen umwandeln lassen. So lässt sich Wärmeenergie auch bei verlustfreier und reversibler Wandlung nur teilweise in mechanische bzw. elektrische Energie konvertieren. Dieser Anteil ist vom Temperaturniveau der zur Verfügung stehenden Wärmeenergie abhängig und wird als Exergie bezeichnet. Sie lässt sich über den thermischen Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses wie folgt nach Gleichung 7.2-2 darstellen:

$$E_{ex} = E_{th} \cdot \eta_c = E_{th} \cdot \left(1 - \frac{T_U}{T_H}\right)$$

Gleichung 7.2-2
Berechnung des Wirkungsgrades.

Hierbei wird der exergetische Anteil der Wärme mit E_{ex}, die Wärmeenergie mit E_{th}, das Temperaturniveau der Wärme in Kelvin mit T_H und die Umgebungswärme mit T_U bezeichnet. Umgekehrt lässt sich z.B. über einen Wärmepumpenprozess aus mechanischer bzw. elektrischer Energie, die den Wert der Energie besitzt, wieder die gesamte Wärmeenergie bereitstellen.

Die Exergie ist also das mechanische bzw. elektrische Äquivalent der Wärmeenergie und in Abbildung 7.2-3 für die verschiedenen Wandlungsvorgänge dargestellt.

Für die Berechnung der Wirkungsgrade und die Wertung der Wärme wird hierbei eine Umgebungstemperatur T_u von 293 K (20°C) angenommen und ein Temperaturniveau der ausgekoppelten Wärme T_o von 373 K (100°C) verwendet. Die Wärmemengen in der Wirkungsgradberechnung wurden daraus abgeleitet mit dem Faktor 0,214 bewertet, der sich aus dem Carnot-Wirkungsgrad ergibt. Dieser Teil ist die Exergie der Wärme. In den folgenden Abbildungen wird der Wirkungsgrad der Wärmebereitstellung immer aufgeteilt nach Exergie und Anergie dargestellt. Energie besteht immer aus Exergie und Anergie (Baehr, 1965; Baehr und Kabelac., 2006). Diese Unterscheidung ist in der Thermodynamik üblich, wohingegen außerhalb des technischen Diskurses diese Unterscheidung in vielen Fällen nicht getroffen wird und dadurch technische Sachverhalte fehlerhaft interpretiert werden können.

Für die Berechnung der Mobilitätspfade im Gutachten wurde auf durchschnittliche Kennwerte aus der mittleren Fahrzeugklasse zurückgegriffen, die in Tabelle 7.2-3 zusammengefasst sind. Alle Werte sind nach dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ermittelt, welcher einheitlich festlegt, unter welchen Bedingungen und mit welchen Geschwindigkeitsabläufen ein Fahrzeug bei der Ermittlung des Energie- bzw. Kraftstoffverbrauchs und den dabei entstehenden Treibhausgasemissionen betrieben wird.

Tabelle 7.2-3
Kennwerte der verwendeten Fahrzeugtypen in den Mobilitätspfaden nach neuem europäischen Fahrzyklus. Die Größe MJ Input beschreibt den Energieträger im Fahrzeug, d.h. ein MJ Kraftstoff bzw. ein MJ Strom.
Quelle: Müller-Langer et al., 2008

Fahrzeugtyp – Antriebsaggregat	Zeit-horizont	Reich-weite in km je MJ_In-put	Wirkungs-grad in MJ_me-chanische Antriebs-energie je MJ_Input
Otto-Verbrennungs-motor für Benzin und Gas (Methan)	2005	0,37	0,26
	2030	0,48	0,29
Diesel-Verbren-nungsmotor	2005	0,43	0,29
	2030	0,53	0,32
Elektromotor	2030	1,11	0,78
PEM-Brennstoff-zellen-PKW mit Elektromotor	2030	0,71	0,39

Pe.
Stroh-Pellet-KohleKW-2005
Restholz-Pellet-KohleKW-2005
Hs.
Stroh-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2005
Restholz-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2005
Roh-gas
Restholz-Rohgas-BrennstZelle(SOFC)-2030
Restholz-Rohgas-GasTurb-2030
Biomethan
Restholz-Biomethan-GuD-KW-2030
BioAbfall-Biomethan-GuD-KW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-GuD-KW-2030
BioAbfall-Biomethan-BHKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-BHKW-2005
Biogas
BioAbfall-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
BioAbfall-Biogas-BHKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BHKW-2005
Hs. + Pe.
KUP-Pellet-KohleKW-2030
KUP-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2030
Roh-gas
KUP-Rohgas-BrennstZelle(SOFC)-2030
KUP-Rohgas-GasTurb-2030
Biomethan
KUP-Biomethan-GuD-KW-2030
Grassilage/Gülle-Biomethan-GuD-KW-2030*
Rutenhirse-Biomethan-GuD-KW-2030
Maissilage-Biomethan-GuD-KW-2005
Grassilage/Gülle-Biomethan-BHKW-2030*
Rutenhirse-Biomethan-BHKW-2030
Maissilage-Biomethan-BHKW-2005
Biogas
Grassilage/Gülle-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2030*
Rutenhirse-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2030
Maissilage-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
Grassilage/Gülle-Biogas-BHKW-2030*
Rutenhirse-Biogas-BHKW-2030
Maissilage-Biogas-BHKW-2005
Pflanzenöl
Raps-Pflanzenöl-BHKW-2005
Jatropha(degradiert)-Pflanzenöl-BHKW-2030
Jatropha-Pflanzenöl-BHKW-2030
Ölpalme(degradiert)-Pflanzenöl-BHKW-2005
Ölpalme(Regenwald)-Pflanzenöl-BHKW-2030
Pellets
Stroh-Pellet-Heizung-2005
Restholz-Pellet-Heizung-2005
KUP-Pellet-Heizung-2030
Rutenhirse-Pellet-Heizung-2030
H2
Restholz-Wasserstoff--BrennstZelle(PEM)-PKW-2030
Bio-methan
BioAbfall-Biomethan-PKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-PKW-2005
Restholz-Biomethan-PKW-2030
E.
Stroh-Ethanol-PKW-2030
Bio-diesel
Altfett-Biodiesel-PKW-2005
Stroh-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Restholz-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Elektr.-mobil
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-2005
Restholz-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-elektroPKW-2030
Rutenhirse-Biogas-BHKW-elektroPKW-2030
Bio-methan
Grassilage/Gülle-Biomethan-PKW-2030*
KUP-Biomethan-PKW-2030
Maissilage-Biomethan-PKW-2005
Bio-ethanol
Getreide-Ethanol-PKW-2005
Maiskörner-Ethanol-PKW-2005
Zuckerrohr(degradiert)-Ethanol-PKW-2030
Zuckerrohr-Ethanol-PKW-2005
Pf.-öl
Raps-Pflanzenöl-PKW-2005
Biodiesel
Raps-Biodiesel-PKW-2005
KUP-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Jatropha(degradiert)-Biodiesel-PKW-2030
Jatropha-Biodiesel-PKW-2030
Ölpalme(degradiert)-Biodiesel-PKW-2005
Ölpalme(Regenwald)-Biodiesel-PKW-2030
Reststoffe
Energiepflanzen
Strom
R.
E.
Wärme
Reststoffe
Energiepflanzen
Mobilität
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Wirkungsgrad [%]
Kraft / Antrieb = 100% Exergie
Strom = 100% Exergie
Wärme - Exergie
Wärme - Anergie

Abbildung 7.2-3
Überblick über die exergetischen und energetischen Wirkungsgrade (ohne bzw. mit hellgelben Balken) der untersuchten Bioenergienutzungspfade – Wirkungsgrad des Biomassekonversionspfades in %. Die Bezeichnungen der Pfade beziehen sich auf die in den Tabellen 7.2-1 und 7.2-2 aufgelisteten Anbaussysteme und Konversionsverfahren
Quelle: WBGU

troherde werden vorwiegend von den zahlenmäßig kleinen reicheren Bevölkerungsgruppen eingesetzt (FAO-RWEDP, 2008).

Der Wirkungsgrad der Holzherde kann sehr einfach und kostengünstig durch eine geänderte Herdbauart erheblich gesteigert werden. In Südindien wurden beispielsweise einfache Lehmherde entwickelt, die einen effizienteren Abbrand ermöglichen, die Wärme auf zwei Herdplatten verteilt bereitstellen und die Wärme der Abluft auf dem Weg in den Schornstein um einen Metallkessel führen, in dem Wasser erwärmt wird (IISc, 2008). Der hierbei erzielte Wirkungsgrad beträgt 40 %, was eine Vervierfachung der Effizienz bedeutet, d.h. bei gleichem Nutzen kann der Biomasseverbrauch gegenüber dem 3-Steine-Herd auf ein Viertel gesenkt werden. Falls keine Abwärmenutzung der Abluft stattfindet, liegt der Wirkungsgrad der Holzherde dennoch bei 25–30 % und damit reduziert sich der Verbrauch von Feuerholz nach wie vor wesentlich um ca. Faktor 2–3 (Jagadish, 2004). Auch die Effizienz der Holzkohleöfen in Lehmbauweise oder aus Metall kann durch ein geeignetes Design zu verbessert werden. Wirkungsgrade von bis zu 40 % sind hier ebenfalls möglich, und auch die Herstellung von Holzkohle kann effizienter (mit Wirkungsgraden bis zu 20 %) gestaltet werden. Diese Technologieverbesserungen können die Gesamteffizienz auf 8 % verdoppeln (Kumar et al., 1990).

Kleinbiogasanlagen

Der Brennstoff Holz lässt sich durch Biogas ersetzen. Werden tierische Exkremente mit Wasser vermischt in eine Kleinst-Biogasanlage gegeben, kann bis zu 80 % der Energie der Reststoffe in Methan umgewandelt und zum Kochen und Beleuchten benutzt werden. Das Methan kann in einem einfachen Biogas-Herd mit einem Gesamtwirkungsgrad von ca. 40 bis 60 % in thermische Energie gewandelt oder über einen Generator mit einer Gesamteffizienz von 15 bis 25 % verstromt werden (FAO-RWEDP, 2008).

Vergasungsanlagen

Die Holzvergasung zur Stromerzeugung ist seit einigen Jahren in Indien Stand der Technik. Abfälle und Reststoffe wie Kokosnussschalen oder Altholz können über den Weg der Vergasung genutzt werden. Diese Reststoffe werden mit einem Wirkungsgrad von ca. 80 % in Rohgas gewandelt. Das Rohgas kann im Dual-Fuel Mode, dem Betrieb eines Dieselgenerators mit 80 % Rohgas und 20 % Diesel, mit einem Wirkungsgrad von 20–25 % in Strom gewandelt werden. Werden Gasmotoren verwendet, lässt sich der Wirkungsgrad auf 25–30 % steigern. Dadurch lassen sich Gesamtwirkungsgrade von ca. 15–25 % erreichen (Dasappa et al., 2003). Vergasungsanlagen können auch zur reinen Wärmebereitstellung (z.B. Trocknung) eingesetzt werden und erzielen Gesamtwirkungsgrade von 30 bis 45 % je nach Biomasse-Rohstoff, also etwa den 3 bis 4 fachen Wert der traditionellen Wärmebereitstellung (Mande und Kishore, 2007). Eine Herausforderung in dieser Technik ist die Reinigung des Abwassers, die durch Gaswäschen anfallen und die Reduzierung der Schadstoffe in den Luftemissionen (Dasappa et al., 2003; Mande und Kishore, 2007).

Pflanzenölmotoren, Aggregate und Blockheizkraftwerke

Verbrennungsmotoren kommen oft zum Einsatz für verschiedene stationäre Zwecke wie etwa dem Mahlen von Lebensmitteln (Mais, Getreide) oder für den Betrieb von Wasserpumpen. Häufig werden sie mit einem Generator zu einem Aggregat gekoppelt und zur Stromversorgung (Öffentliche Gebäude, Krankenhäuser, Schulen, Mini-Grids) verwendet. Diese Aggregate können mit unraffiniertem Pflanzenöl (aus *Jatropha* oder Palmöl) betrieben werden, weisen einen Wirkungsgrad von 20–25 % auf und haben ein großes Potenzial in der ländlichen netzfernen Elektrifizierung, da sie wartungsarm und relativ einfach handhabbar sind (FAO-RWEDP, 2008). Die Abwärme der Aggregate kann z.B. in der Trocknung von landwirtschaftlichen Produkten genutzt werden. Findet eine Abwärmenutzung statt, werden die Aggregate als Blockheizkraftwerke (BHKW) bezeichnet.

7.2.4 Ökonomische Analyse und Bewertung der Konversionsverfahren

7.2.4.1 Gestehungskosten moderner Konversionsverfahren

Die Gestehungskosten traditioneller Konversionsverfahren wie des einfachen Holzherds sind schwierig zu erfassen. Weder die Investitionskosten noch die Brennstoffkosten sind eindeutig zu ermitteln,

was am Beispiel des einfachen Drei-Steine Herdes deutlich wird: Die Investitionskosten für einen solchen Herd sind nicht relevant und die Brennstoffkosten lediglich durch den Arbeitseinsatz geprägt. Aufgrund der schwierigen Datenerfassung der Kosten traditioneller Konversionsverfahren wird in Kapitel 7.2.4 ausschließlich auf die Kosten der modernen Nutzungspfade eingegangen, die in Tabelle 7.2-3 aufgeführt sind.

Die Kosten der Bereitstellung von Bioenergieträgern (Gestehungskosten) haben einen Einfluss auf das wirtschaftliche Substitutionspotenzial biogener Energieträger für fossile Energieträger. Diese Kosten der vom WBGU betrachteten Pfade wurden von Müller-Langer et al. (2008) anhand eines Kostenkalkulationsmodell mittels der Annuitätenmethode nach VDI 2067 und VDI 6025 ermittelt. Hierbei, und bei den in Kapitel 7.3 vorgestellten Treibhausgasbilanzierungen, wurde die sogenannte Allokationsmethode verwendet (Kasten 7.2-4). Die Kostenanalyse umfasst die Bioenergiepfade für Strom und Wärme einschließlich des Verbrennungsmotors bzw. der Heizung (BHKW) und für Mobilität „nur“ bis zu Biokraftstoffen bzw. Bio(fahr)strom, exklusive des Verbrennungsmotors bzw. PKW. Für die Mobilität sind deshalb zusätzlich zu den „Kraftstoff“-Gestehungskosten noch die Mehrkosten hinzugerechnet, die ein Erdgas- oder Elektro-PKW verursacht. Die Annahmen zu finanzmathematischen Rahmenbedingungen, kapital- und betriebsgebundenen Kosten sowie Erlösen sind in Müller-Langer et al. (2008) dargestellt. Als Bezugsjahr für alle Kostenrechnungen wurde aufgrund der Datenverfügbarkeit das Jahr 2005 gewählt, auch für diejenigen Bioenergiepfade, die technisch auf den Zeithorizont 2030 ausgelegt sind.

In den Abbildungen 7.2-4a, b und c sind die Gestehungskosten für eine Energieeinheit Strom oder Wärme bzw. für einen Fahrzeugkilometer in Eurocent dargestellt.

In der Stromerzeugung ist vor allem die Mitverbrennung von Biomasse in Kohlekraftwerken mit Stromgestehungskosten von ca. 4 bis 5 Eurocent/kWh Strom günstig und ökonomisch effizient, da fast keine Technologiekosten anfallen. Für diese Art der Stromerzeugung müssen keine eigenen Bioenergieanlagen gebaut, sondern es können bestehende Anlagen umgerüstet bzw. erweitert werden. Sehr hohe Gestehungskosten haben alle Technologien, die Brennstoffzellen verwenden. Ebenfalls teuer fallen alle Pfade mit Biomassevergasung oder mit Nutzung von Bioabfall aus. Relativ günstig ist hingegen die etablierte Technologie der Biogasanlagen zur Gewinnung von Biogas bzw. Biomethan, deren Gestehungskosten um ca. 10 Cent pro kWh Strom je nach Rohstoff schwanken.

Die Wärmeerzeugung weist in den untersuchten Pfaden Gestehungskosten von ca. 15 Cent pro kWh Wärme auf. Dieser relativ hohe Wert ergibt sich vorwiegend aus den hohen Investitionskosten für eine Pelletheizung, die bei einer Leistung von 15 kW mit ca. 14.000 € angesetzt wurden und einen Anteil an den Gestehungskosten von ca. 50 % ausmachen.

Die Nutzung von Bioenergie im Verkehr ist derzeit in Form von Biokraftstoffen wesentlich günstiger als der Weg über Elektromobilität. Die Mehrkosten entstehen vor allem durch die hohen Investitionskosten und die noch zu geringe Lebensdauer für die Speicherbatterie bzw. die Brennstoffzelle. Die fahrleistungsspezifischen Gestehungskosten von Biokraftstoffen der zweiten Generation sind ca. doppelt so hoch wie die der technisch bereits weit fortgeschrittenen ersten Generation, die auf Mais, Zuckerrohr, *Jatropha*, Ölpalmen oder Altfett basieren.

7.2.5.2 Diskussion der zukünftigen Kostenentwicklung von Bioenergiepfaden

Für alle Pfade gilt: Im Vergleich zum angesetzten Basisjahr 2005 sind die Kosten für den Rohstoff Biomasse bis 2008 erheblich gestiegen. Die Rohstoffkosten sind bis auf wenige Ausnahmen der dominierende Faktor in den Gestehungskosten der Bioenergiepfade (Müller-Langer et al., 2008). Aber auch die Kosten der fossilen Energiebereitstellung haben sich durch steigende Brennstoffpreise in den letzten 3 Jahren deutlich erhöht. Um die zukünftige Entwicklung der Gestehungskosten abzuschätzen, sind insbesondere zwei Parameter, die Rohstoffkosten und die Technologiekosten (Kapitalkosten) zu diskutieren.

Bei den biogenen Rohstoffkosten ist v.a. durch zunehmende Flächenknappheit mit weiteren Anstiegen zu rechnen. Es ist abzusehen, dass die fossilen Brennstoffkosten von Erdöl, Erdgas und Kohle ebenfalls langfristig steigen werden. Eine genaue Prognose zur Kostenrelation der fossilen und biogenen Brennstoffkosten in 2030 ist nicht möglich, weshalb für die folgende Diskussion als vereinfachende Annahme eine konstante Kostenrelation zugrundegelegt wird.

Bei den Technologiekosten ist nach zwei Gruppen zu unterscheiden: den relativ „jungen“ Technologien, deren Investitionskosten stark fallen können und steile Lernkurven aufweisen sowie den bereits am Markt etablierten oder „semi-etablierten“ Technologien, deren Kosten ebenfalls sinken, aber in einem geringeren Ausmaß. Der Anteil der Kapital- bzw. Technologiekosten an den Gestehungskosten ist bei den „jungen“ Technologien besonders hoch, was in Abbildung 7.2-4a, b, und c deutlich zu erkennen ist.

Kasten 7.2-4

Die Allokationsmethode – Anwendung zur Ermittlung des spezifischen Energieaufwands

Um bei der Ermittlung des spezifischen Energieaufwands auch Nebenprodukte (Koppelprodukte) zu berücksichtigen, wird diesen durch die so genannte Allokation ein Teil der aufgewendeten Energie zugeordnet. Die Allokation erfolgt mithilfe von Allokationsfaktoren entlang der Bilanzgrenzen. Diese Faktoren legen fest, welche Anteile jeweils dem Haupt- und dem Koppelprodukt zugeordnet werden. In der Kraft-Wärme-Kopplung wird Strom als Haupt- und Wärme als Koppelprodukt betrachtet.

Die Allokationsfaktoren werden nach der Heizwertmethode ermittelt, die die Energiegehalte der Haupt- und Koppelprodukte (z.B. Hauptprodukt: Rapsöl, Koppelprodukt: Presskuchen) ins Verhältnis zur Summe beider Produkte setzt. Unter Verwendung dieser Faktoren werden die Energieaufwendungen aufgeteilt. In einigen Bioenergiepfaden fallen Strom bzw. Wärme als Koppelprodukte an, die als Strom- bzw. Wärmeäquivalente berücksichtigt werden. Für das Stromäquivalent wird vereinfacht für die Erzeugung von Strom ein Mix aus jeweils 50 % Erdgas-GuD-Kraftwerken (η_{el} von 60 %) und Steinkohlekraftwerken (η_{el} von 44 %) angenommen. Für das Wärmeäquivalent wird ein Erdgasbrennwertkessel (η_{th} von 95 %) verwendet (Gleichung 7.2-3).

Für die Allokation von Strom und Wärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wurde ein „Heizwert" für elektrische Energie von 2,5 kWh / kWh_{el} (Fritsche und Wiegmann, 2008) zugrunde gelegt. Die Allokationsfaktoren für die KWK wurden aus den Einzelwirkungsgraden für Strom und Wärme unter Berücksichtigung der energetischen Wertigkeit („Heizwert") von Strom (2,5) und Wärme (1) ins Verhältnis zur Summe beider Wirkungsgrade einschließlich deren Wertigkeit gesetzt (Gleichung 7.2-4).

$$AF_{el} = \frac{2{,}5 \cdot \eta_{th}}{(2{,}5 \cdot \eta_{el} + \eta_{th})}$$

Gleichung 7.2-4
AF Allokationsfaktor; η_{th} Einzelwirkungsgrad Wärme; η_{el} Einzelwirkungsgrad Strom

$$AF = \frac{\eta_{HP} \cdot H_{u,HP}}{\eta_{HP} \cdot H_{u,HP} + \Sigma\,(H_{u,KP,n}) + W_{el} \cdot F_{el\text{-}Äqu} + W_{th} \cdot F_{th\text{-}Äqu}}$$

Gleichung 7.2-3
AF Allokationsfaktor; - Massestrom Hauptprodukt; $H_{u,HP}$ unterer Heizwert Hauptprodukt; - Massestrom Koppelprodukt(e); $H_{u,KP,n}$ unterer Heizwert Koppelprodukt(e); W_{el} Strom als Koppelprodukt; $F_{el\text{-}Äqu}$ Stromäquivalent; W_{th} Wärme als Nebenprodukt; $F_{th\text{-}Äqu}$ Wärmeäquivalent

Tabelle 7.2-4
Wirkungsgrade und Allokationsfaktoren für die im Gutachten analysierten Bioenergiepfade mit Kraft-Wärme-Kopplung.
Quelle: Müller-Langer et al, 2008

Technologie	Elektrischer Wirkungsgrad h_{el}	Thermischer Wirkungsgrad h_{th}	Allokationsfaktor für Strom als Hauptprodukt
Blockheizkraftwerk (BHKW)	38 %	44 %	0,68
Brennstoffzelle (SOFC)	48 %	23 %	0,84
Dampfturbine	23 %	60 %	0,49
Gasturbine	25 %	55 %	0,53
Steinkohlekraftwerk	45 %		1,0
Gas- und Dampfkraftwerk (GuD)	43 %	30 %	0,78

Zu den „jungen" Technologien zählen die Lithium-Ionen-Batterien, Brennstoffzellen und alle Biomassevergasungsanlagen, die holzartige Biomasse zu Biomethan, Rohgas oder Fischer-Tropsch-Diesel wandeln. Bei diesen Technologien ist ein hohes Kostensenkungspotenzial zu erwarten. Daher kann die Lernkurve der Technologiekosten mit 80 % angesetzt werden, d.h. dass sich diese Kosten bei einer Verdopplung der installierten Leistung auf 80 % verringern. Dieser Wert ist an die Lernkurve von Photovoltaikanlagen angelehnt, die in den letzten Jahren ein ähnliches Kostensenkungspotenzial aufzeigten (Staffhorst, 2006).

Abbildung 7.2-4a
Gestehungskosten von Bioenergiepfaden zur Stromproduktion. Die Beiträge der Kapital- bzw. Technologiekosten, der Betriebskosten und der Rohstoffkosten sind jeweils einzeln kenntlich gemacht. * Für diese Pfade wurde eine Mischung aus 70 % Gras und 30 % Gülle angenommen. Die Bezeichnungen der Pfade beziehen sich auf die in den Tabellen 7.2-1 und 7.2-2 aufgelisteten Anbaussysteme und Konversionsverfahren
Quelle: WBGU und Müller-Langer- et al., 2008

Abbildung 7.2-4b
Gestehungskosten von Bioenergiepfaden zur Wärmeproduktion. Die Beiträge der Kapital- bzw. Technologiekosten, der Betriebskosten und der Rohstoffkosten sind jeweils einzeln kenntlich gemacht. Die Bezeichnungen der Pfade beziehen sich auf die in den Tabellen 7.2-1 und 7.2-2 aufgelisteten Anbaussysteme und Konversionsverfahren.
Quelle: WBGU und Müller-Langer et al., 2008

Abbildung 7.2-4c
Gestehungskosten von Bioenergiepfaden im Mobilitätsbereich. Die Beiträge der Kapital- bzw. Technologiekosten, der Betriebskosten und der Rohstoffkosten sind jeweils einzeln kenntlich gemacht. Zusätzlich sind die Mehrkosten der Fahrzeuge ausgewiesen. * Für diese Pfade wurde eine Mischung aus 70 % Gras und 30 % Gülle angenommen. Die Bezeichnungen der Pfade beziehen sich auf die in den Tabellen 7.2-1 und 7.2-2 aufgelisteten Anbaussysteme und Konversionsverfahren.
Quelle: WBGU und Müller-Langer et al., 2008

Zu den „(semi-)etablierten“ Technologien zählen am Markt befindliche Technologien wie Biogasanlagen, Biokraftstoffanlagen zur Herstellung von Bioethanol, Biodiesel (1. Generation), Pflanzenöl-BHKW, Pelletheizungen, Heizkraftwerke und die Mitverbrennung in Steinkohlekraftwerken. Für diese Technologien ist nur ein moderates Kostenreduktionspotenzial anzusetzen mit einer Lernkurve von 90 %. Dieser Wert ist an die Lernkuve von Windenergieanlagen angelehnt, der sich in derselben Größenordnung befindet (Durstewitz et al., 2008).

Wird der Zeitraum von 2005 bis 2030 betrachtet und für alle Technologien ein globales Wachstum der installierten Leistung von 20 % pro Jahr angenommen, betragen die Kosten der „jungen“ Technologien noch ein Viertel (ca. 25 %) der ursprünglichen im Gutachten aufgeführten Kosten von 2005 und der „(semi-)etablierten“ die Hälfte (ca. 50 %). In den meisten Fällen werden unter diesen Voraussetzungen die heute noch sehr teueren Technologien voll konkurrenzfähig sein und so die Transformation der Energiesysteme hin zu sehr effizienten und emissionsarmen Technologien erlauben. Die breite Einführung der Elektromobilität im Straßenverkehr, der Kraft-Wärme-Kopplung zur Strom- und Wärmebereitstellung, der zunehmenden Direkterzeugung von Strom über Wind-, Wasser- und Solarenergie wird auch zu einer Verschiebung der Nutzanwendungen für Bioenergie führen: Durch die Kostenreduktion wird die Herstellung von einigen Bioenergieträgern wie Biomethan konkurrenzfähig zu fossiler Energiebereitstellung. In Ländern mit ausgebautem Erdgasnetz wird die Anwendung von Biomethan zur Stromerzeugung über BHKW und GuD-Kraftwerken interessant. In Ländern, die nicht über ein ausgebautes Erdgasnetz verfügen, können flüssige Bioenergieträger wie Pflanzenöl oder Bioethanol für die stationäre, kombinierte Strom- und Wärmebereitstellung als Ergänzung zur Direkterzeugung von Strom aus Wind-, Wasser- und Solarenergie eingesetzt werden und auch dort Regel- und Ausgleichsenergie für schwankende Einspeiseleistungen bereitstellen.

7.3 Treibhausgasbilanzen

7.3.1 Die Ökobilanz-Methodik

Die Methodik der Ökobilanzierung ist in der ISO-Norm-Reihe 14040ff ausführlich beschrieben und an vielen Fallbeispielen erprobt. Bei der Ökobilanzierung werden entlang der Produktlinie Inputs erfasst (wie etwa metallische Rohstoffe oder fossile oder erneuerbare Energieträger) sowie Outputs wie etwa Emissionen von umwelt- oder gesundheitsbelastenden Stoffen. Diese werden in verschiedenen Wirkungskategorien zusammengefasst wie etwa die klimarelevanten Stoffe bzw. ihre Emissionen in der Wirkungskategorie Global Warming Potential (GWP). Die einzelnen Gase (CO_2, CH_4, N_2O usw.) werden dabei gemäß ihrem Beitrag zum Treibhauseffekt gewichtet.

Wie bei allen Bilanzierungsmethoden gibt es auch innerhalb der vorgeschriebenen Ökobilanz-Norm Interpretationsspielräume und vor allem die Möglichkeit zu unterschiedlichen System-Definitionen und Abgrenzungen, die das Ergebnis beeinflussen können. Dies betrifft etwa die Berücksichtigung von Koppel-Produkten wie z.B. die gleichzeitige Gewinnung von Rapsöl und Rapsschrot/Tierfutter oder die gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme bei der Kraft-Wärme-Kopplung. Ähnliche Abgrenzungsprobleme gibt es auch bei betriebswirtschaftlichen Bilanzierungen. Die Ergebnisse von Ökobilanzen können auch je nach Region unterschiedlich ausfallen: Eine Tonne Aluminium wird beispielsweise in Norwegen umweltfreundlicher produziert als in Deutschland, weil der hohe Stromverbrauch in Norwegen fast ausschließlich durch Wasserkraft gedeckt wird.

In der Regel werden bei einer Ökobilanz die eingesetzten Energieträger und die damit verbundene Primärenergie (KEA – kumulierter Energie-Aufwand) nach fossilen und regenerativen Energieträgern und ggfs. noch nach Einsatz von Kernenergie differenziert. Bei den Treibhausgas- (THG-) Bilanzen wird biogenes CO_2 in der Regel nicht extra ausgewiesen, sondern mit Null-Emissionen in die Ökobilanz aufgenommen. Bei klimaschutzbezogenen Bilanzierungen werden oft nur die Energie und die THG-Emissionen bilanziert, und es wird auf die in der Ökobilanz ansonsten vorgeschriebene Wirkungsabschätzung und Bewertung (unterschiedlicher Umweltauswirkungen) verzichtet. Bei produktbezogenen Bilanzierungen von THG-Emissionen wird neuerdings meist der Begriff (Product) Carbon Footprint verwendet, und es gibt Vorschläge für eine spezielle Auslegungskonvention (PAS 2050, second draft, British Standard), die derzeit im Rahmen eines deutschen Forschungsvorhaben kommentiert und weiterentwickelt wird. Ferner muss darauf hingewiesen werden, dass es weitere klimaschutzbezogene Bilanzierungen gibt, deren Methodik und Systemgrenzen unterschiedlich sind: Bilanzierung der THG-Emissionen von Unternehmen ohne Vorketten (z.B. Carbon Disclosure Project, Greenhouse Gas Protocol), Bilanzierung der THG-Emissionen von Ländern und ausgewählten Systemen (Kyoto-Protokoll, Emissionshandel) sowie Bilanzierung der THG-Emissionsminderung von Kompensations-Projekten (CDM-Projekte).

Darüber hinaus werden im Rahmen von EU-Richtlinien neue Bilanzierungsregeln gesetzlich festgelegt werden, z.B. mit der EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie (ab 2010, THG-Berichtspflichten und Reduction Targets für alle Kraftstoffe) oder der EU-Erneuerbare-Energien-Richtlinie mit „Guarantee of Origin“ bei Grünem Strom und Allokationsregeln für Biokraftstoffbilanzen. Hier besteht ein erheblicher Harmonisierungsbedarf, zu dem u.a. Aktivitäten der EEA in der EU und der GBEP GHG Task Force im globalen Rahmen beizutragen versuchen.

Beim Vergleich unterschiedlicher THG-Bilanzierungen muss daher darauf geachtet werden, nach welcher Methodik und mit welchen Systemgrenzen und Abgrenzungen (z.B. bei Koppel-Produkten) gearbeitet wurde. Bei unterschiedlichen Systemgrenzen können sich die Ergebnisse erheblich unterscheiden. Bei bioenergiebezogenen Bilanzierungen sind folgende sechs Festlegungen besonders wichtig:

- Welches System und welches Produkt und für welche funktionelle Einheit wurde bilanziert? Ein Beispiel ist etwa Benzin, das entweder vor dem Einsatz im Pkw oder inklusive des Einsatzes im Pkw bilanziert werden kann.
- Für welchen Zeitraum wird bilanziert? Dies ist z.B. bei der Betrachtung von Landnutzungsänderungen wichtig.
- Wurden nur Treibhausgase bilanziert und bewertet oder auch weitere Ressourcen und Umweltauswirkungen (z.B. Primärenergiebedarf, Wasserverbrauch, Düngemitteleinsatz, Flächeninanspruchnahme oder Feinstaub)? Die untenstehenden Ergebnisse (Kap. 7.3.2) zeigen, dass die Analysen und Bewertungen bezogen auf verschiedene Parameter (z.B. Energieverbrauch oder Flächeninanspruchnahme) unterschiedlich ausfallen können.
- Wurden direkte Landnutzungsänderungen einbezogen?
- Wurden indirekte Landnutzungsänderungen einbezogen?
- Wie wurden die Umweltaspekte wie Flächeninanspruchnahme, Energieverbrauch oder Treibhaus-

Kasten 7.3-1

Umgang mit Koppelprodukten – Die Allokationsmethode

Treibhausgasbilanzen und Ökobilanzen werden für bestimmte Prozesse oder Produkte erstellt. In der Landwirtschaft und bei technischen Prozessen entstehen aber oft neben dem Hauptprodukt ein oder mehrere Nebenprodukte („Co-Produkte"). Bei der Bilanzierung müssen dann die eingesetzten Ressourcen wie Energie, Fläche oder Wasser und die entstandenen Emissionen auf die entstandenen Produkte verteilt werden.

Die Ökobilanz-Norm ISO 14040ff. schlägt dafür verschiedene Modelle in der nach folgenden Priorität vor: (1) die Vermeidung von Allokation durch Systemgrenzenerweiterung, (2) die Einführung von Gutschriften (für die jeweiligen Co-Produkte) oder (3) die Allokation nach Kriterien wie Energiegehalt, Masse oder Preis.

Beim Vergleich vieler unterschiedlicher Optionen (wie im vorliegenden Fall mehrerer Dutzend unterschiedlicher Bioenergiepfade) sind die ansonsten zu priorisierenden Modelle Systemgrenzenerweiterung oder Gutschriften nach einheitlichem Modus wenig praktikabel, so dass meistens Allokationen durchgeführt werden. Bei der Behandlung von Bioenergiepfaden bietet es sich an, die Allokation auf Basis der Energie vorzunehmen. Entsprechend wurde in den letzten Monaten im Zuge der rechtlichen Ausgestaltung von Nachhaltigkeitsanforderungen für Biokraftstoffe sowie durch Arbeiten für das Umweltbundesamt zur Allokationsfrage bei der Kraft-Wärme-Kopplung verfahren Die Nachhaltigkeitsverordnung zum Biokraftstoffquotengesetz und vergleichbare Vorschlägen der EU-Kommission legen als Allokationsmethode die heizwertbezogene Aufteilung der Umweltlasten zwischen Haupt- und Nebenprodukten fest (vgl. IFEU, 2007).

Bei der Auswertung der Ergebnisse muss die vorgenommene Allokation berücksichtigt werden. Beispielsweise wird für den Anbau einer definierten Menge von Raps eine durchschnittlich erforderliche Anbaufläche festgelegt. Da beim Anbau und der Verarbeitung aber Co-Produkte entstehen, z.B. Rapsöl und Rapsschrott (das als Tierfutter dient), wird die real eingesetzte Anbaufläche zwischen diesen Produkten aufgeteilt und beiden Produkten wird (nur) eine Teilfläche zugeordnet. Wenn man nun für einen bestimmten Prozess (z.B. Strom aus Rapsöl) die zugehörige Fläche ausweist (vg. Tab. Xx), wird – wegen der erfolgten Allokation – nur die Teilfläche ausgewiesen. Die real benutzte Anbaufläche für den Rapsanbau ist aber größer. Die Allokation bzw. in diesem Fall der „Abzug" der Teilfläche für den Rapsschrott ist inhaltlich auch dadurch gerechtfertigt, dass für die Produktion von Tierfutter sonst eine andere Agrarfläche benötigt würde.

gasemissionen bei Koppelprodukten aufgeteilt (Kasten 7.3-1)?

Durchschnittsdaten und Optimierungen

Bei den in Kapitel 7.3.2 dargestellten Treibhausgas-Bilanzen des Anbaus und der industriellen Verarbeitung von Biomasse für mehrere Dutzend Bioenergiepfade und dementsprechend bei den jeweiligen Vermeidungskosten wurde von Durchschnittswerten oder typischen Werten ausgegangen. Je nach Eingangsparameter können die Werte erheblich schwanken. Die Hektar-Erträge können je nach Klima, Böden, Düngung, Bewässerung und Anbauform unterschiedlich hoch sein, ebenso gibt es bei der Verarbeitung unterschiedliche Prozesse und vor allem auch unterschiedliche Anlagengrößen. All dies kann Einfluss auf das Ergebnis haben.

Umgekehrt heißt dies, dass durch gezielte Auswahl von Anbauflächen, Bearbeitung und Auswahl und Optimierung von Prozessen die Treibhausgas-Emissionen gegenüber dem ermittelten Durchschnittswert noch deutlich reduziert werden können.

Beispielsweise werden beim Produktionsprozess von biogenem Methan hohe Treibhausgasemissionen frei. Ursachen hierfür sind die Methan- und Lachgasemissionen bei der Nachgärung des Gärrückstandes. In der Schweizer EMPA-Studie (Zah et al., 2007) wird gezeigt, dass durch gezielte Maßnahmen wie Abdeckung des Nachgärbehälters die Emissionen zum Großteil reduziert werden können, die CO_2-Einsparung verbessert sich dadurch von ca. 35 % auf über 90 %. Diese Abdeckung entspricht 2007 bereits dem Stand der Technik: Sie ist in Deutschland gesetzlich vorgeschrieben, in Entwicklungsländern dagegen wenig verbreitet.

7.3.2 Treibhausgasbilanzen ausgewählter Bioenergienutzungspfade

Zu den Treibhausgasbilanzen von Bioenergienutzung gibt es eine Reihe von Studien, die sich zum überwiegenden Teil auf Flüssigkraftstoffe beziehen. Für das vorliegende Gutachten wurden THG- und Energie-Bilanzen nicht nur für den Verkehr, sondern auch für andere Einsatzzwecke wie Wärme und Strom erstellt. Dafür wurde eine Auswahl exemplarischer Nutzungspfade getroffen (Kap. 7.2.3.1). In die Bilanzierungen wurden die Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen einbezogen. Dazu wurden vom WBGU Expertisen in Auftrag gegeben (Fritsche und Wiegmann, 2008; Müller-Langer et al., 2008). Die Treibhausgasbilanzen gehen vom Status Quo aus und bilanzieren Änderungen durch den Anbau von Biomasse. Unabhängig davon gibt es durch die Art der Landnutzung kontinuierliche Treibhausgasflüsse – Ackerland ist in der Regel

Kasten 7.3-2

Quantifizierung der Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen

Direkte Landnutzungsänderungen (direct land-use change = dLUC) entstehen, wenn eine Fläche vor dem Anbau von Energiepflanzen durch eine andere Nutzung (z.B. Wald, Grasland oder Acker mit Nahrungsmittelanbau) geprägt oder ungenutzt war. Die mit direkten Landnutzungsänderungen verbundenen Emissionen werden in Lebenszyklusanalysen berücksichtigt, und es liegen Standardwerte (auch Default-Werte genannt) für diese Emissionen vor, die für die Analysen herangezogen werden können (Gnansounou et al., 2008). Tabelle 7.3-1 zeigt die vorgegebenen Standardwerte der auf einen 20-Jahres-Zeitraum umgelegten jährlichen Emissionen für verschiedene Landnutzungsänderungen auf der Grundlage von IPCC (2006), wie sie in der Studie für den WBGU verwendet wurden. Auf individuellen Flächen können diese Werte in Abhängigkeit von den Bewirtschaftungs- und Umbruchmethoden erheblich von den angegebenen Standardwerten abweichen.

Tabelle 7.3-1
Standardwerte für flächenbezogene Treibhausgasemissionen durch direkte Landnutzungsänderungen für verschiedene als Energiepflanzen nutzbare Kulturen in kg CO_2 pro ha und Jahr. Die flächenbezogenen Emissionen sind auf einen 20-Jahres-Zeitraum nach der Landnutzungsänderung umgelegt und beinhalten nicht die Emissionen aus den Lebenswegen der weiteren Verarbeitung im Bioenergiepfad.
Quelle: Fritsche und Wiegmann, 2008

Kultur	vorherige Nutzung	THG-Emissionen [kg CO_2/(ha*a)]
Weizen	Grünland	2.630
	Acker	0
Mais	Grünland	2.630
	Acker	0
Pappel (KUP)	Grünland	1.255
	Acker	-1.375
Zuckerrohr	Savanne	14.428
	degradiertes Land	-3.722
	Acker	-55
Raps	Grünland	2.630
	Acker	0
Ölpalme	tropischer Regenwald	28.417
	degradiertes Land	-13.750
Jatropha	Acker	-458
	degradiertes Land	-4.125
Rutenhirse	Grünland	1.897
	Acker	-733

* hellrot = C-Freisetzung
hellgrün = Kohlenstoffbindung
ohne Farbe = CO_2-neutral

Wenn auf Flächen zum Energiepflanzenanbau vorher eine andere Nutzung – etwa zur Nahrungs- oder Futtermittelproduktion – stattfand, die durch den Biomasseanbau verdrängt wird, können darüber hinaus auch indirekte Landnutzungsänderungen ausgelöst werden (indirect land-use change = iLUC, häufig auch als leakage bezeichnet): Solange weiterhin Bedarf an den vorher auf dieser Fläche produzierten Nahrungs- oder Futtermitteln besteht, kann deren Produktion verlagert werden. Als Folge kann z.B. die Produktion auf bestehenden Ackerflächen intensiviert oder es können weitere Flächen als Acker- oder Weideflächen erschlossen werden. Besonders, wenn zusätzliche Flächen dafür umgenutzt werden, die einen hohen Kohlenstoffvorrat aufweisen, etwa Wälder oder Feuchtgebiete/Moore, können dabei erhebliche CO_2-Emissionen freigesetzt werden (Kap. 4.2.3), die zwar an einem anderen Ort, aber im Grunde durch den Energiepflanzenanbau verursacht wurden und diesem daher anzurechnen sind. Indirekte Landnutzungsänderungen können aber auch ausgelöst werden, wenn zwar keine direkte Landnutzungsänderung für den Energiepflanzenanbau, aber eine Änderung in der Nutzung der Ernteprodukte (etwa Mais für Biogas statt als Futtermittel) erfolgt.

Die Treibhausgasemissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen können nicht direkt ermittelt und quantifiziert, sondern nur modelliert werden. Es wurden verschiedene Methoden vorgeschlagen bzw. befinden sich in der Entwicklung, um modellgestützte Aussagen zu erlauben. Wären die Flächen bekannt, die durch den Verdrängungseffekt betroffen sind, könnten die Emissionen ohne großen Aufwand bestimmt werden, da sie denen der direkten Landnutzungsänderung entsprechen. Da die Verdrängungseffekte aber über den Welthandel auch außerhalb einer Region oder eines Landes auftreten können, ist eine eindeutige Zuordnung zur Biomasseproduktion auf bestimmten Flächen nicht möglich. Mittelfristig könnten durch ein verlässliches globales Kataster zumindest auf aggregierter Ebene die Veränderungen in der Landnutzung im Vorjahreszeitraum erfasst werden, womit aber immer noch eine Zuordnung zu den vielfältigen Ursachen und Allokation zu ggf. stattfindendem verstärkten Bioenergieanbau zu leisten wäre.

Quantitative Modellergebnisse

Searchinger et al. (2008) verwenden ein ökonometrisches Gleichgewichtsmodell, um den induzierten Flächenbedarf durch Verdrängungseffekte und die daraus resultierenden CO_2- Emissionen durch Simulation des Welthandels abzuschätzen. Diese Analyse bezieht sich auf die Marktsituation und Dynamik in den USA und betrifft vor allem Ethanol aus Mais. Kritikpunkte an der Methode sind u.a., dass die Produktionszunahme durch Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge bzw. Vermeidung logistischer Verluste und Marktverzerrungen (z.B. Zölle) im Modell nicht erfasst werden (Fritsche und Wiegmann, 2008).

Die hier vorgestellten Bilanzen verwenden den vom Öko-Institut Darmstadt entwickelten Ansatz eines „iLUC-Faktors“ (Fritsche und Wiegmann, 2008): Die indirekt ausgelösten Landnutzungsänderungen werden hier für das Referenzjahr 2005 aus den global gehandelten Agrarprodukten abgeleitet, die theoretisch durch den Biomasseanbau „verdrängt“ werden konnten. Hierbei handelt es sich vereinfacht um Mais, Weizen, Raps, Soja und Palmöl. Aus

den Handelsanteilen der „Hauptländer“ EU, USA, Brasilien und Indonesien an diesen Produkten und den jeweiligen Erträgen wird eine gewichtete globale „Flächenbelegung“ ermittelt, die sich durch verdrängte Nahrungs- und Futtermittel ergeben würde. Für die theoretisch in den o. g. Ländern bzw. der EU erfolgenden Landnutzungsänderungen wurde angenommen, dass in der EU und den USA Grünland (Weideland, Grasland), in Brasilien Savanne und in Indonesien tropischer Regenwald in zusätzliche landwirtschaftliche Produktionsfläche für die „verdrängten“ Flächen umgewandelt würde.

Das theoretische THG-Emissionspotenzial durch indirekte Landnutzungsänderung wird durch die Kohlenstoffmenge charakterisiert, die je Fläche sowohl im Boden als auch in der oberirdischen Vegetation gespeichert ist. Da je nach Klimazone und Boden diese Menge variiert, sind die Anteile der entsprechenden Flächen relevant. Mit den ober- und unterirdischen Kohlenstoffbilanzen für diese Regionen wurde daraus ein „global gewichtetes“ theoretisches Emissionspotenzial von 400 t CO_2 pro ha berechnet. Bei einer Umlegung auf 20 Jahre ergibt dies ein theoretisches flächenbezogenes CO_2-Emissionspotenzial von 20 t CO_2 pro ha und Jahr.

Das modellierte theoretische iLUC-Potenzial kommt in der Realität zumindest derzeit und in den nächsten Jahren nicht vollständig zum Tragen, da verdrängte Nahrungs- und Futtermittelproduktion nicht allein durch zusätzliche Flächennachfrage, sondern auch durch Steigerung der Erträge auf bestehenden Anbauflächen sowie durch (Re)Aktivierung derzeit nicht genutzter Flächen erfolgen kann. Daher wurde das maximale Emissionspotenzial mit 75 % des theoretischen Potenzials abgeschätzt. Als mittleres Niveau wurden 50 % des theoretischen Werts angesetzt und als minimal ein Wert von 25 %. Aus diesen Angaben kann über die jeweiligen Flächenerträge des Bioenergieanbaus dann ein energiebezogener Emissionsfaktor für indirekte Landnutzungseffekte (iLUC-Faktor) bestimmt werden. Bei zunehmendem Anbau von Bioenergiepflanzen und steigender Nahrungsmittelnachfrage wird der iLUC-Faktor im Lauf der nächsten Jahrzehnte ansteigen und muss dann entsprechend angepasst werden. Dabei könnte zunehmend auf reale Inventurwerte zurückgegriffen werden.

Tabelle 7.3-2 gibt einen Überblick über die CO_2-Emissionen direkter Landnutzungsänderung sowie die mit Hilfe des iLUC-Faktors (50 %) bestimmten Emissionen aus indirekter Landnutzungsänderung für verschiedene Umnutzungen von Landflächen. Die Werte sind jeweils auf den

Tabelle 7.3-2
Energiebezogene Treibhausgasemissionen aus direkter (dLUC) und indirekter Landnutzungsänderung (iLUC) bei verschiedenen Anbausystemen und verschiedenen Vornutzungen. Die Emissionen sind jeweils auf den Brutto-Energiegehalt des Rohstoffs Biomasse bezogen. Negative Werte bedeuten, dass durch den Energiepflanzenanbau eine Kohlenstoffspeicherung erfolgt. Die Angaben beinhalten nicht die Emissionen aus den Lebenswegen der weiteren Verarbeitung im Bioenergiepfad.
Quelle: Fritsche und Wiegmann, 2008

Kultur	vorherige Nutzung	dLUC [t CO_2/TJ]	iLUC 50 % [t CO_2/TJ]	Summe LUC [t CO_2/TJ]
Weizen-Wiese	Grünland	27	100	126
Weizen Acker	Acker	0	100	100
Mais-Wiese	Grünland	17	63	80
Mais-Acker	Acker	0	63	63
KUP-Wiese	Grünland	9	74	83
KUP-Acker	Acker	-10	74	64
Zuckerrohr -Savanne	Savanne	21	0	21
Zuckerrohr-degrad.	degradiertes Land	-5	0	-5
Zuckerrohr-Acker	Acker	-0,1	15	15
Raps-Wiese	Grünland	31	119	150
Raps-Acker	Acker	0	119	119
Ölpalme-trop.Regenwald	trop. Regenwald	172	0	172
Ölpalme-degrad.	degradiertes Land	-83	0	-83
Jatropha-Acker	Acker	-4	88	84
Jatropha- marginal	marginales Land	-76	0	-76
Rutenhirse-Wiese	Grünland	9	50	59
Rutenhirse-Acker	Acker	-4	50	46

Energieertrag durch den Biomasseanbau bezogen, daher wird der Einfluss der indirekten Landnutzungsänderungen tendenziell um so höher, je geringer der flächenspezifische Energieertrag der betrachteten Energiepflanze ist. Dies führt etwa zu den vergleichsweise hohen iLUC-Werten bei Raps, Weizen und *Jatropha*.

Für die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen wird vom WBGU jeweils ein iLUC-Faktor von Null angesetzt. Es ist aber bei ausgewählten Rest- und Abfallstoffen, für die bereits heute Verwendungen vorliegen (etwa durch die Verwendung von Reststoffen als Viehfutter) möglich, dass durch die energetische Verwendung Nutzungskonkurrenzen auftreten, die indirekt zu einem vermehrten Anbau pflanzlicher Rohstoffe und damit auch zu indirekten Landnutzungsänderungen mit den entsprechenden Emissionen führen. Der WBGU schätzt diese Effekte aber als gering ein.

Der WBGU hält die Berücksichtigung von Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen bei der Bewertung der Klimaschutzwirkung von Bioenergienutzung für unverzichtbar. Obwohl die Forschung zur quantitativen Bestimmung dieser Emissionen erst am Anfang steht, ist es notwendig, bereits jetzt diese Effekte auch quantitativ abzuschätzen. Der WBGU schlägt daher vor, den beschriebenen iLUC-Faktor (50 %) für die Standardsetzung (Kap. 10.3) zu verwenden, ihn aber zukünftig entsprechend neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse weiterzuentwickeln. Ein Verzicht auf die Verwendung eines iLUC-Faktors aufgrund zwangsläufiger Unsicherheiten bei der Modellierung würde bedeuten, dass man indirekte Lanndnutzungsänderungen gar nicht betrachtet, obwohl sie einen sehr großen Einfluss auf die Treibhausgasbilanzen von Bioenergie haben.

eine Quelle, Grasland eine Senke von Treibhausgasen. In den Treibhausgasbilanzen der verschiedenen Bioenergiepfade werden die Treibhausgasflüsse von unveränderter Landnutzung nicht erfasst, sondern nur die einer geänderten Landnutzung. Die Methodik zur Ermittelung der Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen wird in Kasten 7.3-2 beschrieben.

Abbildung 7.3-1 zeigt zunächst im Überblick für verschiedene Anbausysteme ausschließlich diejenigen Emissionen, die durch die direkten und indirekten Landnutzungsänderungen entstehen. Die Emissionen sind auf den Brutto-Energiegehalt der angebauten bzw. geernteten Biomasse bezogen und über einen 20-Jahres-Zeitraum gemittelt. Zum Vergleich ist das Emissionsniveau fossiler Kraftstoffe angegeben. Es wird deutlich, dass einige Landnutzungsänderungen und ihre indirekten Effekte bezogen auf den Energiegehalt der produzierten Biomasse bereits vergleichbare oder höhere Emissionen verursachen bzw. verursachen können als fossile Kraftstoffe, ohne dass die weiteren mit der Bioenergienutzung verbundenen Emissionen und Umwandlungsverluste aus dem Anbau und der Verarbeitung berücksichtigt wären.

Schon aus dieser Analyse lassen sich nach Ansicht des WBGU bestimmte Landnutzungsänderungen für den Energiepflanzenanbau als nicht tolerierbar ausschließen. Die höchsten Emissionen ergeben sich bei der Umnutzung von tropischen Regenwäldern für den Anbau von Ölpalmen, wobei es sich ausschließlich um Emissionen aus der direkten Landnutzungsänderung handelt. Die Umnutzung von Äckern für Energiepflanzen führt in der Regel nicht zu Emissionen aus der direkten Landnutzungsänderung – im Falle von der Umnutzung für Kurzumtriebsplantagen (KUP) wird sogar Kohlenstoff im Boden gespeichert – dafür ist aber mit erheblichen Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen zu rechnen, da die bisherige Nutzung von der Fläche verdrängt wird. Die Umnutzung von Grasland führt sowohl zu Emissionen aus der direkten als auch aus indirekten Landnutzungsänderungen. Am besten schneidet der Anbau mehrjähriger Pflanzen auf degradierten Flächen ab, da hier eine Kohlenstoffspeicherung im Boden erreicht werden kann und keine indirekten Landnutzungsänderungen erwartet werden (ausser evt. verdrängter Weidenutzung). In diesen Fällen, z.B. dem Anbau von Ölpalmen oder *Jatropha* auf degradiertem Land, kann allein schon durch diesen Anbau ein Klimaschutzeffekt erreicht werden, ohne dass die Substitution fossiler Energieträger einbezogen wird.

Für die weitere Analyse wurden, wie in Kapitel 7.2 beschrieben, exemplarisch verschiedene Anbau- und Nutzungsarten von Biomasse für die Mobilität, für Strom und für Wärme ausgewählt (Biomassenutzungspfade), deren Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus bilanziert wurden (Fritsche und Wiegmann, 2008). Für die Emissionen aus dem Anbau von Energiepflanzen wurden mit Ausnahme der tropischen Energiepflanzen jeweils die Bedingungen in Deutschland zugrunde gelegt (Tab. 7.2-1). Die folgenden Analysen stellen diese Lebenszyklusemissionen ins Verhältnis mit Emissionen, die in einem Referenzsystem entstehen, um Aussagen über das Treibhausgasreduktionspotenzial der Bioenergienutzungspfade abzuleiten. Dabei hat die Wahl der Referenzsysteme einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Geht man etwa davon aus, dass durch die Bioenergienutzung die Nutzung von Erdgas substituiert wird, ergeben sich viel geringere Treibhausgasminderungen als bei einem Referenzsystem auf der Basis von Kohle. Welcher Energieträger durch die Bioenergienutzung in der Realität verdrängt wird, hängt neben dem bestehenden Energiemix auch von den derzeitigen und künftigen politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab. Der WBGU

Abbildung 7.3-1
Treibhausgasemissionen aus direkter (dLUC) und indirekter Landnutzungsänderung (iLUC) für verschiedene Energiepflanzen und Landflächen bezogen auf den Brutto-Energiegehalt der eingesetzten Biomasse in tCO_2eq pro TJ Biomasse. Die Werte sind jeweils auf einen Zeitraum von 20 Jahren umgelegt (Kasten 7.3-2). Für mit * gekennzeichnete Systeme fallen keine indirekten Landnutzungen an, da davon ausgegangen wird, dass keine Vornutzung verdrängt wird. Eine Beschreibung der Abkürzungen für die Anbausysteme findet sich in Tabelle 7.2-1.
Quelle: Fritsche und Wiegmann, 2008

wählt als Referenzsystem jeweils einen Mix aus fossilen Energieträgern, der sich getrennt nach den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität am fossilen Energiemix des Jahres 2005 in Deutschland orientiert (Tab. 7.3-3). In den Sektoren Verkehr und Wärmeversorgung werden heute fast ausschließlich fossile Energien eingesetzt, so dass die gewählten fossilen Referenzsysteme hier klar zu definieren sind. Im Stromsektor lag in 2005 der durchschnittliche Emissionswert in Deutschland bei 648 g pro kWh_{el} (Fritsche und Wiegmann, 2008). Dieser bezieht sich auf den gesamten Strommix und umfasst daher auch erneuerbare Energien und Kernenergie. Der fossile Anteil, der über 60 % der Stromerzeugung darstellt, setzte sich 2005 aus ca. 80 % Stein- und Braunkohle und zu ca. 20 % aus Erdgas zusammen. Als Referenzsystem wählt der WBGU einen Mix aus 80 % Steinkohle und 20 % Erdgas. Die Emissionen des gewählten Referenzsystems für Strom liegen somit mit 953 g pro /kWh_{el} über dem Wert des gesamten Strommix, ein Referenzsystem auf der Basis von Erdgas-GuD-Kraftwerken läge mit 425 g pro kWh_{el} darunter.

Aus Sicht des WBGU sind die politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen so zu setzen, dass die Bioenergienutzung primär fossile Energieträger und hier vor allem Kohle ersetzt. Nur in diesem Fall sind Vermeidungsleistungen erreichbar, wie sie in den folgenden Analysen dargestellt werden. Dies gilt auch bei einem zukünftig sehr hohen Anteil erneuerbarer Energieträger. Ebenso sind diese Annahmen nicht generell auf andere Länder übertragbar. In Norwegen, einem Land mit hohem Wasserkraftanteil und daher mit sehr niedrigem fossilen Anteil an der Stromerzeugung, liegt der verwendete Referenzwert weit über den Emissionen der derzeitigen Stromerzeugung. In einem Land mit sehr hohem Anteil fossilen Stromes wie China (vorwiegend Kohlekraftwerke) liegt der verwendete Referenzwert unter den tatsächlichen Emissionen der Stromerzeugung. In einer zusätzlichen Analyse wird der Effekt unterschiedlicher Referenzsysteme im Sinne einer Sensitivitätsanalyse verdeutlicht (Abb. 7.3-5).

Die Emissionen und Kosten, die den jeweiligen Referenzsystemen zugerechnet werden, beziehen sich auf den technologischen Stand von 2005 in Deutschland (Nitsch, 2007; Fritsche und Wiegmann, 2008; Müller-Langer et al., 2008; BMWi, 2008). Die untersuchten Bioenergiepfade beziehen sich entweder auf den technologischen Stand von 2005 oder auf den erwarteten technologischen Stand von 2030 und

Tabelle 7.3-3
Emissionen der fossilen Referenzsysteme, die vom WBGU zur Ableitung der Treibhausgasvermeidungspotenziale der einzelnen Bioenergienutzungspfade herangezogen werden.
Quelle: WBGU basierend auf Daten von Fritsche und Wiegmann, 2008 sowie Müller-Langer et al., 2008

	Fossiler Referenzfall	Emissionen pro Brennstoffmenge g CO_2eq / kWh_{th}	Emissionen pro End- bzw. Nutzenergie g CO_2eq je kWh_{el} bzw. kWh_{th} bzw. Fzg-km	Anteil am Mix [%]	Referenzwert g CO_2eq je kWh_{el} bzw. kWh_{th} bzw. Fzg-km
Strom	Steinkohle-KW	411	1.085	80	953
	Erdgas-GuD	234	425	20	
Wärme	Heizöl-Heizung	321	376	40	327
	Erdgas-Heizung	252	295	60	
Mobilität	Benzin-PKW	328	250	60	230
	Diesel-PKW	316	201	40	

sind jeweils entsprechend gekennzeichnet. Wegen der Unsicherheit bezüglich der Zusammensetzung der zukünftigen Energiesysteme und den damit verbundenen sehr schwierigen Kostenabschätzungen sowie aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden für alle Pfade die Referenzsysteme für das Jahr 2005 (Tab. 7.3-2) herangezogen, und zwar sowohl bezüglich der Kosten als auch bezüglich der Emissionswerte. Es ist abzusehen, dass bis 2030 die spezifischen Emissionen der fossilen Energiebereitstellung sinken werden, da diese Technologien durch ihre Weiterentwicklung effizienter werden. Daher werden voraussichtlich die Treibhausgasvermeidungsleistungen derjenigen Bioenergiepfade, die sich auf das Jahr 2030 beziehen, geringer sein als dargestellt.

Im Folgenden werden drei Parameter vorgestellt, die sich jeweils auf die Klimaschutzwirkung der verschiedenen Bioenergiepfade beziehen. Anhand dieser Darstellung wird jeweils ihre Eignung zum Vergleich der Klimaschutzwirkung verschiedener Bioenergienutzungspfade, auch im Hinblick auf die Erarbeitung von Standards (Kap. 10.3) diskutiert, um schließlich die Vorschläge des WBGU abzuleiten. Auch bei der Effizienzverbesserung traditioneller Bioenergienutzung können Treibhausgasemissionsminderungen erreicht werden (Kasten 7.3-3). Hierzu hat der WBGU jedoch keine Berechnungen durchgeführt.

Prozentuale Treibhausgasminderung bezogen auf die Endenergie

Abbildung 7.3-2 zeigt einen Überblick über die relativen prozentualen Treibhausgas-Reduktionspotenziale verschiedener Bioenergienutzungspfade bezogen auf die End- bzw. Nutzenergie. Für diesen Parameter wird jeweils angenommen, dass eine bestimmte Energiedienstleistung (d.h. eine kWh Strom, eine kWh Wärme oder ein Fahrzeugkilometer), die vorher durch die Nutzung fossiler Energieträger erbracht wurde, nun auf der Basis von Biomasse erbracht wird. Die Treibhausgasminderung wird dabei als prozentuale Minderung bei konstanter Energiedienstleistung angegeben. Dieser – oft gewählte – Parameter ist allerdings nur bedingt aussagekräftig. Zwar können damit besonders schlechte Optionen ausgeschlossen werden, aber der Parameter eignet sich – wie unten diskutiert – nicht zum Vergleich zwischen unterschiedlichen Anwendungsbereichen (Strom, Wärme, Mobilität) von Bioenergie. Auch kann man aus diesem Parameter nicht auf die

Abbildung 7.3-2
Prozentuale Minderung der Treibhausgasemissionen gegenüber einem fossilen Referenzsystem durch die Substitution fossiler Brennstoffe bezogen auf die End- bzw. Nutzenergie für ausgewählte Bioenergienutzungspfade. Als Referenzsystem wurde für die Strompfade ein Mix aus 80 % Steinkohle und 20 % Erdgasnutzung herangezogen, für die Wärmepfade 60 % Erdgas und 40 % Erdöl und für die Mobilitätspfade 60 % Benzin und 40 % Diesel (Tabelle 7.3-3). Die gelben Balken beinhalten die Lebenszyklus-Emissionen inklusive der Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen (dLUC). Die grünen Balken berücksichtigen darüber hinaus Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen (iLUC 50 %; Kasten 7.3-2). Für die Energiepflanzenpfade wurde (wenn nicht anders gekennzeichnet) angenommen, dass der Anbau auf einem Acker erfolgt. Bei der Nutzung von Reststoffen wird nur ein Balken dargestellt, da keine Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen erwartet werden. Negative Werte bezeichnen eine Emissionssteigerung bezüglich des Referenzsystems. * Bei Pfaden, die Grassilage/Gülle als Substrat haben wurde angenommen, dass in Deutschland Grassilage keine Emissionen aus Landnutzungsänderungen verursacht, was aber nicht global übertragbar ist. Die Bezeichnungen der Pfade beziehen sich auf die in den Tabellen 7.2-1 und 7.2-2 aufgelisteten Anbaussysteme und Konversionsverfahren.
Quelle: WBGU basierend auf Daten von Fritsche und Wiegmann, 2008 sowie Müller-Langer et al., 2008

Pe.
Hs.
Roh-gas
Biomethan
Biogas
Hs. + Pe.
Roh-gas
Biomethan
Biogas
Pflanzenöl
Pellets
H2
Bio-methan
E.
Bio-diesel
Elektr.-mobil
Bio-methan
Bio-ethanol
Pf.-öl
Biodiesel
Stroh-Pellet-KohleKW-2005
Restholz-Pellet-KohleKW-2005
Stroh-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2005
Restholz-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2005
Restholz-Rohgas-BrennstZelle(SOFC)-2030
Restholz-Rohgas-GasTurb-2030
Restholz-Biomethan-GuD-KW-2030
BioAbfall-Biomethan-GuD-KW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-GuD-KW-2030
BioAbfall-Biomethan-BHKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-BHKW-2005
BioAbfall-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
BioAbfall-Biogas-BHKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BHKW-2005
KUP-Pellet-KohleKW-2030
KUP-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2030
KUP-Rohgas-BrennstZelle(SOFC)-2030
KUP-Rohgas-GasTurb-2030
KUP-Biomethan-GuD-KW-2030
Grassilage/Gülle-Biomethan-GuD-KW-2030*
Rutenhirse-Biomethan-GuD-KW-2030
Maissilage-Biomethan-GuD-KW-2005
Grassilage/Gülle-Biomethan-BHKW-2030*
Rutenhirse-Biomethan-BHKW-2030
Maissilage-Biomethan-BHKW-2005
Grassilage/Gülle-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2030*
Rutenhirse-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2030
Maissilage-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
Grassilage/Gülle-Biogas-BHKW-2030*
Rutenhirse-Biogas-BHKW-2030
Maissilage-Biogas-BHKW-2005
Raps-Pflanzenöl-BHKW-2005
Jatropha(degradiert)-Pflanzenöl-BHKW-2030
Jatropha-Pflanzenöl-BHKW-2030
Ölpalme(degradiert)-Pflanzenöl-BHKW-2005
Ölpalme(Regenwald)-Pflanzenöl-BHKW-2030
Stroh-Pellet-Heizung-2005
Restholz-Pellet-Heizung-2005
KUP-Pellet-Heizung-2030
Rutenhirse-Pellet-Heizung-2030
Restholz-Wasserstoff--BrennstZelle(PEM)-PKW-2030
BioAbfall-Biomethan-PKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-PKW-2005
Restholz-Biomethan-PKW-2030
Stroh-Ethanol-PKW-2030
Altfett-Biodiesel-PKW-2005
Stroh-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Restholz-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-2005
Restholz-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-elektroPKW-2030
Rutenhirse-Biogas-BHKW-elektroPKW-2030
Grassilage/Gülle-Biomethan-PKW-2030*
KUP-Biomethan-PKW-2030
Maissilage-Biomethan-PKW-2005
Getreide-Ethanol-PKW-2005
Maiskörner-Ethanol-PKW-2005
Zuckerrohr(degradiert)-Ethanol-PKW-2030
Zuckerrohr-Ethanol-PKW-2005
Raps-Pflanzenöl-PKW-2005
Raps-Biodiesel-PKW-2005
KUP-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Jatropha(degradiert)-Biodiesel-PKW-2030
Jatropha-Biodiesel-PKW-2030
Ölpalme(degradiert)-Biodiesel-PKW-2005
Ölpalme(Regenwald)-Biodiesel-PKW-2030
-214%
141%
220%
-367%
154%
271%
Reststoffe
Energiepflanzen
Strom
R.
E.
Wärme
Reststoffe
Energiepflanzen
Mobilität
-80
-60
-40
-20
0
20
40
60
80
100
120
Treibhausgasminderung bezogen auf die Erd- bzw. Nutzenergie [%]
Lebenszyklus-Emissionen ohne iLUC
Lebenszyklus-Emissionen mit iLUC bzw. iLUC irrelevant
50% Reduktion relativ zum gewählten fossilen Referenzfall
100% Reduktion relativ zum gewählten fossilen Referenzfall

jeweils eingesetzte Menge an Biomasse oder die eingesetzte Fläche zum Anbau der Biomasse schließen.

Da bei der Nutzung von Reststoffen angenommen wird, dass diese nicht zu Landnutzungsänderungen und damit verbundenen Emissionen führt, ist ihre Klimaschutzwirkung in allen Fällen positiv. Die relative Klimaschutzwirkung der Nutzung von Energiepflanzen hängt dagegen sehr stark von den Emissionen aus den direkten wie indirekten Landnutzungsänderungen ab. Bei denjenigen Pfaden, bei denen indirekte Landnutzungsänderungen zu erwarten sind, führt die Berücksichtigung der damit verbundenen Emissionen in der Regel mindestens zu einer Halbierung des Treibhausgasminderungspotenzials. Da die indirekten Landnutzungsänderungen aber auf jeden Fall mit berücksichtigt werden sollten (Kap. 5), kann nicht generell von einer zufriedenstellenden Klimaschutzwirkung von Energiepflanzen ausgegangen werden. Bei ungünstigen Gegebenheiten können einzelne Pfade unter Einbeziehung der indirekten Landnutzungsänderungen in der Bilanz sogar negative Werte zeigen, d.h. höhere Emissionen als das Referenzsystem aufweisen. Landnutzungsänderungen können die Klimabilanz sowohl positiv als auch negativ beeinflussen. Deutlich wird dies beispielsweise beim Anbau von Ölpalmen. Wird für den Anbau tropischer Regenwald umgebrochen, können bis zu vier Mal mehr Treibhausgase freigesetzt werden als im fossilen Referenzsystem (Hooijer et al., 2006). Werden hingegen Ölpalmen auf marginalem, derzeit wenig genutztem Land angebaut, kann eine besonders hohe Klimaschutzwirkung erzielt werden. Die Emissionsreduktion gegenüber dem fossilen Referenzsystem kann dann 200 % und mehr betragen, so dass der Nutzungspfad eine reale Kohlenstoffsenke darstellt. Unabhängig vom technischen Nutzungspfad lassen sich besonders hohe relative Emissionsminderungen durch den Anbau tropischer, mehrjähriger Pflanzen (Ölpalme, *Jatropha*, Zuckerrohr) auf marginalen Flächen erzielen.

Emissionsminderungen um mehr als 100 % kommen dadurch zustande, dass durch den Energiepflanzenanbau so viel Kohlenstoff auf der Fläche (d.h. in der Regel im Boden) aufgenommen wird, dass die bei Anbau und Nutzung der Biomasse entstehenden Treibhausgasemissionen überkompensiert werden. Dies kann bei entsprechend gutem Management vor allem auf marginalen Flächen erreicht werden. Auch einige Pfade, die den Anbau von KUPs betreffen, zeigen Emissionsminderungen von über 100 %, wenn die indirekten Landnutzungsänderungen nicht berücksichtigt werden. Dies liegt daran, dass die gezeigten Pfade den Anbau von KUPs auf Ackerflächen voraussetzen, was zu einer Akkumulation von Kohlenstoff im Boden führt. Allerdings ist bei einer solchen Umnutzung wie dargestellt mit indirekten Landnutzungsänderungen zu rechnen. Wird für den Anbau von KUPs Grasland umgenutzt, ist mit einer schlechteren Klimabilanz zu rechnen, die je nach angebauter Pflanze in der Größenordnung von 20 % geringer ist als der direkte Anbau auf Acker ohne Grünlandumbruch (Abb. 7.3-1; Fritsche und Wiegmann, 2008).

Die in Abbildung 7.3-2 gezeigte prozentuale THG-Minderung entspricht bei der Mobilität von der Konzeption her (aber mit anderen Referenzsystemen) dem Parameter, der in der deutschen Nachhaltigkeitsverordnung für Biokraftstoffe oder im Richtlinien-Entwurf der Europäischen Kommission mit Bezug auf Biokraftstoffe in der Diskussion ist (BMU, 2007b). Dort wird vorgeschlagen, dass Biokraftstoff mindestens zu 35 % bzw. 50 % Treibhausgasminderung gegenüber der vergleichbaren Menge an fossilem Kraftstoff führen muss, um dem Standard zu genügen (Kap. 10.3). Die prozentualen Emissionsminderungen zeigen für fast alle betrachteten Pfade eine sehr hohe THG-Minderung von über 50 %, solange – wie bei den Reststoffen – keine indirekten Landnutzungsänderungen zu Buche schlagen (Abb. 7.3-2). Eine Minderung um 50 % wird in der Regel aber nicht erreicht, wenn indirekte Landnutzungsänderungen zu berücksichtigen sind, d.h. Acker oder Grasland für den Anbau der Energiepflanzen umgenutzt wird. Bei Flüssigkraftstoffen im Verkehr zeigt die Analyse bei allen betrachteten Pfaden, bei denen

Kasten 7.3-3

Treibhausgasreduktionen durch Effizienzverbesserungen bei der traditionellen Biomassenutzung

Werden traditionelle Holzherde durch effiziente Holzherde ersetzt, kann nach Bhattacharya et al. (2002) der Treibhausgasausstoß bei gleicher Nutzenergie um ca. 60 % reduziert werden, beim Ersatz durch Biogas-Herde sogar um 95 %. Dabei geht es nicht um die CO_2-Emissionen: Bei der Biomassenutzung anfallende CO_2-Emissionen werden allgemein (z.B. auch in den oben gezeigten Treibhausgasbilanzen) nicht als Emission angesehen, da nur so viel CO_2 emittiert wird, wie von der Pflanze beim Aufwuchs aufgenommen wurde. Dies gilt für traditionelle Biomassenutzung grundsätzlich ebenso wie für moderne. Traditionelle Holzherde emittieren aber aufgrund unvollständiger Verbrennungsprozesse größere Mengen an anderen Treibhausgasen wie CH_4 und N_2O. Diese Emissionen werden durch die Einführung effizienter Holzherde gesenkt. Wenn das Holz darüber hinaus nicht nachhaltig geerntet wurde, d.h. zu einem Rückgang des Kohlenstoffspeichers in der Biosphäre führt (z.B. Entwaldung), kann auch dies vermindert und damit netto Emissionen vermieden werden.

Energiepflanzen eingesetzt werden, deren Anbau zu indirekten Landnutzungsänderungen führt, sogar eine negative Emissionsbilanz, d.h. die Emissionen sind höher als sie bei der Verwendung fossiler Kraftstoffe wären.

Der WBGU hat den dargestellten Parameter analysiert, da er für den Biokraftstoffbereich Gegenstand der derzeitigen Diskussion über Standards ist. Für diesen Anwendungsbereich, nämlich den Vergleich der Klimaschutzwirkung verschiedener Biokraftstoffpfade untereinander, ist dieser Parameter auch sinnvoll und anwendbar, da der Wirkungsgrad der verschiedenen Kraftstoffpfade vergleichbar ist. Der WBGU hält jedoch eine erweiterte Analyse für notwendig, bei der alle Energiepfade und nicht nur die Kraftstoffpfade sinnvoll verglichen werden können, so dass gezeigt werden kann, in welchem Anwendungsfeld die größte absolute Klimaschutzwirkung mit dem begrenzt vorhandenen Potenzial an nachhaltig verfügbarer Biomasse erzielt werden kann. Bei Betrachtung des Parameters „Prozentuale anwendungsspezifische Treibhausgasminderung“ ist etwa beim Vergleich der Reststoffpfade kein systematischer Unterschied zwischen den Strom-, Wärme und Kraftstoffpfaden zu erkennen. Ganz offensichtlich ist der Beitrag, den die Bioenergie zum Klimaschutz leisten kann, nicht durch die Menge an fossilem Kraftstoff oder fossil erzeugter Energie begrenzt, die potenziell ersetzt werden können, sondern durch die für den nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen verfügbare Fläche bzw. durch die Menge an nachhaltig verfügbarer Biomasse, die die fossilen Energieträger ersetzen kann. Der Parameter „Prozentuale anwendungsspezifische Treibhausgasminderung “ ist daher nur bedingt aussagekräftig für die Fragestellung des WBGU.

Absolute jährliche Treibhausgasminderung pro Fläche

Um die aus Klimasicht besten Bioenergiepfade zu finden, werden die Bioenergiepfade nach dem Parameter „Absolute flächenspezifische Treibhausgasminderung“ ausgewertet. Dargestellt wird dabei also die jährliche Treibhausgasminderung, die durch die auf einer bestimmten Fläche angebauten Energiepflanzen (ausgedrückt in t CO_2eq pro ha und Jahr) erreicht werden kann. Zusätzlich wird die jährliche Treibhausgasminderung dargestellt, die mit einer Einheit Rohstoff bzw. Primärenergie Biomasse (ausgedrückt in t CO_2eq pro TJ Biomasse-Rohstoff) erreicht werden kann.

Abbildung 7.3-3a zeigt die absolute Minderung der THG-Emissionen durch die Substitution fossiler Brennstoffe für verschiedene Bioenergienutzungspfade, bezogen auf die Anbaufläche für Energiepflanzen in temperaten Klimazonen, Abb. 7.3-3b zeigt dasselbe für tropische Energiepflanzen. Pfade, die sich ausschließlich auf die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen beziehen, sind nicht aufgeführt, da hier der Bezug zur Anbaufläche nicht möglich ist bzw. nicht sinnvoll erscheint.

Zielrichtung dieser Analyse ist die Frage: Mit welchem Bioenergienutzungspfad kann angesichts der begrenzt verfügbaren Flächen für den nachhaltigen Energiepflanzenanbau die höchste Treibhausgasreduktion erreicht werden? Vorab soll aber noch einmal darauf hingewiesen werden, dass das Ergebnis von der gewählten Allokationsmethodik beeinflusst wird (Kasten 7.3-1). Die Flächen entsprechen jeweils nicht der gesamten realen Anbaufläche für die Biomasse, sondern nur den Teilflächen, die für die Koppelprodukte alloziert wurden. Aufgrund dieser Allokation kann die Analyse nicht für eine Hochrechung auf die global notwendigen realen Flächen zur Erreichung bestimmter Minderungen genutzt werden.

Bei allen Pfaden für temperate Energiepflanzen wird angenommen, dass der Anbau auf einem Acker erfolgt. Würde statt dessen eine Umnutzung von Grasland für den Anbau erfolgen, wären die durch die Energiepflanzenproduktion verursachten Emissionen um ca. 20 % höher und die Vermeidungsleistung geringer. Die absoluten Minderungspotenziale bezogen auf die zugeordnete Anbaufläche weisen eine sehr viel höhere Streuung auf als die in Abbildung 7.3-2 aufgeführten relativen Minderungspotenziale bezogen auf die Endenergie. Diese Streuung ist z.T. auf die unterschiedlichen Wirkungsgrade der Energiewandlung zurückzuführen, die Werte sind aber auch sehr stark von den Flächenerträgen der verschiedenen Anbausysteme abhängig. Da diese stark von der Klimazone abhängen, werden hier temperate und tropische Anbausysteme getrennt dargestellt. In den Tropen sind aufgrund der ganzjährigen Vegetationsperiode, der höheren Temperaturen sowie der höheren Sonneneinstrahlung im Prinzip deutlich größere Erträge möglich als in temperaten Gebieten, sofern die Bodenbedingungen günstig sind und die Wasserversorgung gewährleistet ist.

Aber auch Anbaumethoden und Bodenqualität führen zu großen Unterschieden. Beispielsweise variiert der Ertrag von Zuckerrohr zwischen 5 und 120 t Trockenmasse pro ha und Jahr (Kap. 7.1). Bei den vorliegenden Berechnungen wurden jeweils exemplarische Werte für die Flächenerträge verwendet, die in Tabelle 7.3-4 aufgeführt sind und der jeweiligen Literaturbandbreite gegenübergestellt werden.

Es wird deutlich, dass bezogen auf die Anbaufläche bei der Stromerzeugung und der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung im Vergleich zur reinen Wärmeerzeugung und der Mobilität in der Regel eine höhere absolute THG-Reduktion erreicht werden kann.

Abbildung 7.3-3
Absolute Minderung der THG-Emissionen durch die Substitution fossiler Brennstoffe für verschiedene Energiepflanzen in temperaten Klimazonen (a) bzw. tropischen Klimazonen (b) bezogen auf die zugeordnete Anbaufläche (Kasten 7.3-1) in tCO_2eq pro ha und Jahr. Als Referenzsystem wurde für die Strompfade ein Mix aus 80 % Steinkohle und 20 % Erdgasnutzung herangezogen und für die Mobilitätspfade 60 % Benzin und 40 % Diesel (Tabelle 7.3-3). Die gelben Balken beinhalten die Lebenszyklus-Emissionen inklusive der Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen (dLUC). Die grünen Balken berücksichtigen darüber hinaus Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen (iLUC 50 %; Kasten 7.3-2). Es wurde (wenn nicht anders gekennzeichnet) angenommen, dass der Anbau der Energiepflanzen auf einem Acker erfolgt. Negative Werte bezeichnen eine Emissionssteigerung bezüglich des Referenzsystems. * Bei Pfaden, die Grassilage/Gülle als Substrat haben wurde angenommen, dass in Deutschland keine Emissionen aus Landnutzungsänderungen entstehen, was aber nicht global übertragbar ist. Die Bezeichnungen der Pfade beziehen sich auf die in den Tabellen 7.2-1 und 7.2-2 aufgelisteten Anbaussysteme und Konversionsverfahren.
Quelle: WBGU basierend auf Daten von Fritsche und Wiegmann, 2008 sowie Müller-Langer et al., 2008

Tabelle 7.3-4
Brutto-Energie-Hektarerträge, die zur Berechnung der THG-Emissionen in den einzelnen Bioenergienutzungspfaden verwendet wurden sowie die errechnete Bandbreite aus verschiedenen Hektarerträgen der Literatur. Bei Palmöl beziehen sich die Literaturwerte allein auf die Ölfrüchte, während der hier verwendete Wert die gesamte gerntete Biomasse umfasst. Dies ist durch die Methodik der Allokation (Kasten 7.3-1) erforderlich. Die Werte sind daher nicht vergleichbar.
Quelle: Fritsche und Wiegmann, 2008 und WBGU

		Brutto-Energieertrag in GJ/ha*a		
		In Berechnungen verwendet (Fritsche und Wiegmann, 2008)		Errechnet aus der Literaturbandbreite aus Kap. 7.1
Kultur	**Region**	**2005**	**2030**	**2005**
Palmöl	Tropen	500	660	220–480
Palmöl (degradiertes Land)	Tropen	350	462	110–240
Jatropha (Acker)	Tropen	–	113	5–310
Jatropha (marginales Land)	Tropen	–	54	5–155
Zuckerrohr	Tropen	650	700	160–1.960
Maissilage	Temperierte Zone	211	250	
Körnermais	Temperierte Zone	159	–	120–210
Rapssaat	Temperierte Zone	84	–	75–105
Triticale	Temperierte Zone	100	–	50–105
Rutenhirse	Temperierte Zone	–	200	90–300
Pappel (KUP)	Temperierte Zone	–	135	35–350
Grassilage	Temperierte Zone	100	–	100–210

Zur Einordnung der THG-Vermeidungsleistung pro Fläche kann als Vergleichsmaßstab die Kohlenstoffsequestrierung herangezogen werden, die durch Aufforstung auf dieser Fläche erreicht werden könnte. Nach Righelato et al. (2007) können etwa durch die Aufforstung von temperatem Ackerland mit Kiefern über einen 30-Jahres-Zeitraum im Mittel 12 t CO_2 (entsprechend 3,2 t C) pro ha und Jahr gespeichert werden. Eine solche Umnutzung würde allerdings mutmaßlich dieselben indirekten Landnutzungsänderungen auslösen wie der Energiepflanzenanbau auf der entsprechenden Fläche, daher sollten hier auch Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen von 10 t CO_2 pro ha und Jahr gegengerechnet werden (Kasten 7.3-2). Es zeigt sich, dass bis auf die Elektromobilität die Vermeidungsleistungen der untersuchten temperaten Pfade im Mobilitätsbereich durchweg unter dem hier genannten Aufforstungswert liegen, während im Strom- und KWK-Bereich vergleichbare oder höhere Emissionsminderungen erreicht werden können. Der WBGU hält den Anbau von Energiepflanzen für den Klimaschutz nur dann für sinnvoll, wenn sichergestellt ist, dass die damit verbundenen Emissionsminderungen höher sind als solche, die durch andere Maßnahmen wie Aufforstung auf derselbe Fläche unter Berücksichtung indirekter Landnutzungsänderungen erreicht werden können.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die durch Aufforstung erreichbare Kohlenstoffspeicherung regional unterschiedlich sein kann. Die Kohlenstoffspeicherkapazität in der Biomasse von Aufforstungen hängt stark vom Standort, dem Bestandesalter und den Baumarten ab (Nabuurs et al., 2007). Beispiele aus den Tropen: Eine in den 1930er Jahren gepflanzte tropische Aufforstung mit damals 13 Baumarten auf einer ehemaligen Weidefläche beherbergte knapp 60 Jahre später 57 Baumarten und speicherte durchschnittlich 5,1 t CO_2 (oder 1,4 t C) pro ha und Jahr (Silver et al., 2004). Auf einer ehemaligen Brachfläche in Indien speicherte eine tropische Baumplantage innerhalb von fünf Jahren nach Aufforstung mit *Gmelina arborea* netto 14,3 t CO_2 (3,9 t C) pro ha, d.h. durchschnittlich etwa 3 t CO_2 (0,8 t C) pro ha und Jahr (Swamy und Puri, 2005). Righelato et al. (2007) geben für die natürliche Sukzession von verlassenem tropischen Ackerland ein CO_2-Speicherung von 15–29 t CO_2 (4–8 t C) pro Jahr und ha an.

Absolute jährliche THG-Minderung pro Menge an eingesetzer Biomasse

Der diskutierte flächenbezogene Parameter eignet sich für den Vergleich von Energiepflanzenpfaden,

kann aber für die Bewertung der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen nicht herangezogen werden. Hierfür eignet sich der Bezug der Emissionen auf den Primärenergiegehalt des Biomasserohstoffes. Dies ermöglicht einen umfassenden Vergleich der Bioenergiepfade.

Abbildung 7.3-4 zeigt die absolute Minderung der THG-Emissionen durch die Substitution fossiler Brennstoffe für verschiedene Bioenergienutzungspfade bezogen auf den Bruttoenergiegehalt der eingesetzten Biomasse. Dargestellt wird nur der Anteil des Energiegehaltes, der der jeweiligen Endnutzung zugeordnet wird. Die anderen Anteile werden Koppelprodukten zugeordnet (Kasten 7.3-1).

Zielrichtung dieser Analyse ist die für den WBGU relevante Frage: Mit welchem technischen Nutzungspfad kann bei einer gegebenen Menge Biomasse am meisten Treibhausgasreduktion erreicht werden? Dieser energiebezogene Parameter ist nach Ansicht des WBGU der geeignete Parameter zur übergreifenden Beurteilung der THG-Vermeidungsleistung von Bioenergiepfaden und sollte somit zur Standardsetzung herangezogen werden.

Der Vergleich der Abbildungen 7.3-4 und 7.3-2 macht deutlich, dass im mobilen Bereich zwar ähnliche prozentuale Emissionsreduktionen bezogen auf die Endenergie erreicht werden können, dass aber die stationären Anwendungen bei gleicher Menge an eingesetztem Rohstoff Biomasse deutlich höhere absolute Vermeidungsleistungen erreichen. Im Transportsektor bildet die Elektromobilität eine Ausnahme mit vergleichbaren Werten zur Stromerzeugung und zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung. Ebenfalls eine Ausnahme bildet die Nutzung von Biodiesel von Ölpalmen, die auf marginalen Flächen angebaut wurden. Diese zeigt sehr hohe Vermeidungsleistungen, die jedoch wiederum bei der Nutzung desselben Rohstoffs im stationären Bereich übertroffen werden. Der große Einfluss der Landnutzungsänderungen auf die THG-Minderungsleistung wird wie in den vorangestellten Abbildungen 7.3-2 und 7.3-3 sehr deutlich sichtbar.

Betrachtet man allein die Reststoffe, wird deutlich, dass die unterschiedlichen Technologien der Stromerzeugung keinen großen Einfluss auf das Minderungspotenzial haben. Die Herstellung von Biomethan kann noch um ca. 20 % höhere Minderungspotenziale erreichen, wenn das abzutrennende CO_2 dauerhaft gespeichert wird (Kasten 7.2-2). Abgesehen von der Elektromobilität erreichen die Pfade, bei denen die Reststoffe im Verkehr eingesetzt werden, nur etwa die Hälfte der Vermeidungsleistung der Verstromungspfade. Hohe Vermeidungsleistungen, die noch über denjenigen von Reststoffen liegen, können durch Anbausysteme wie *Jatropha* und Palmöl auf marginalen Flächen und deren Verarbeitung zu Flüssigkraftstoffen erreicht werden. Auch bei diesen wird aber wiederum deutlich, dass sie im Stromsektor eine höhere Vermeidung erzielen als im Verkehrsektor. Die Vermeidungsleistung bei Nutzung von Energiepflanzen, die auf Äckern angebaut wurden, wird sehr stark durch die Berücksichtigung indirekter Landnutzungsänderungen gemindert.

Aus dem Vergleich der Bioenergienutzungspfade anhand dieses Parameters wird deutlich, dass eine Reduktion um einen bestimmten prozentualen Wert in allen Anwendungsfeldern (Strom, Wärme und Mobilität) im Fall der Stromerzeugung zu deutlich höheren absoluten Emissionsminderungen führt. Ein Standard, der eine prozentuale THG-Minderung bezogen auf die End- bzw. Nutzenergie etabliert, ist daher nicht zielführend, wenn das Ziel die Förderung von Bioenergiepfaden mit möglichst hoher Klimaschutzwirkung ist. Der WBGU schlägt daher die Entwicklung eines Standards vor, der sich am Parameter „Absolute jährliche THG-Minderung pro Menge an eingesetzter Biomasse“ orientiert. Dabei müssen die Zahlenwerte für einen solchen Standard auf das gewählte Referenzsystem abgestimmt sein, da dies einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis hat (Abb. 7.3-5). Der Standard sollte als Voraussetzung für die Förderung von Bioenergie in Industrieländern (Kap. 10.3 und 10.7) so gewählt sein, dass er sich an besten verfügbaren Systemen orientiert.

Abbildung 7.3-4
Absolute Minderung der THG-Emissionen durch die Substitution fossiler Brennstoffe für verschiedene Bioenergienutzungspfade bezogen auf den Brutto-Energiegehalt der eingesetzten Biomasse. Als Referenzsystem wurde für die Strompfade ein Mix aus 80 % Steinkohle und 20 % Erdgasnutzung herangezogen, für die Wärmepfade 60 % Erdgas und 40 % Erdöl und für die Mobilitätspfade 60 % Benzin und 40 % Diesel (Tabelle 7.3-3). Die gelben Balken beinhalten die Lebenszyklus-Emissionen inklusive der Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen (dLUC). Die grünen Balken berücksichtigen darüber hinaus Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen (iLUC 50 %; Kasten 7.3-2). Für die Energiepflanzenpfade wurde (wenn nicht anders gekennzeichnet) angenommen, dass der Anbau auf einem Acker erfolgt. Bei der Nutzung von Reststoffen wird nur ein Balken dargestellt, da keine Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen erwartet werden. Negative Werte bezeichnen eine Emissionssteigerung bezüglich des Referenzsystems. * Bei Pfaden, die Grassilage/Gülle als Substrat haben wurde angenommen, dass in Deutschland Grassilage keine Emissionen aus Landnutzungsänderungen verursacht, was aber nicht global übertragbar ist. Die Bezeichnungen der Pfade beziehen sich auf die in den Tabellen 7.2-1 und 7.2-2 aufgelisteten Anbaussysteme und Konversionsverfahren. Die vertikalen roten Linien markieren den vom WBGU vorgeschlagenen Wert für einen Mindeststandard (30 t CO_2eq/TJ) sowie den Wert, der als Voraussetzung für die Förderung von Bioenergiepfaden erreicht werden sollte (60 t CO_2eq/TJ; Kap. 10.3).
Quelle: WBGU basierend auf Daten von Fritsche und Wiegmann, 2008 sowie Müller-Langer et al., 2008

Pe.
Stroh-Pellet-KohleKW-2005
Restholz-Pellet-KohleKW-2005
Hs.
Stroh-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2005
Restholz-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2005
Roh-gas
Restholz-Rohgas-BrennstZelle(SOFC)-2030
Restholz-Rohgas-GasTurb-2030
Biomethan
Restholz-Biomethan-GuD-KW-2030
BioAbfall-Biomethan-GuD-KW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-GuD-KW-2030
BioAbfall-Biomethan-BHKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-BHKW-2005
Biogas
BioAbfall-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
BioAbfall-Biogas-BHKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BHKW-2005
Hs. + Pe.
KUP-Pellet-KohleKW-2030
KUP-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2030
Roh-gas
KUP-Rohgas-BrennstZelle(SOFC)-2030
KUP-Rohgas-GasTurb-2030
Biomethan
KUP-Biomethan-GuD-KW-2030
Grassilage/Gülle-Biomethan-GuD-KW-2030*
Rutenhirse-Biomethan-GuD-KW-2030
Maissilage-Biomethan-GuD-KW-2005
Grassilage/Gülle-Biomethan-BHKW-2030*
Rutenhirse-Biomethan-BHKW-2030
Maissilage-Biomethan-BHKW-2005
Biogas
Grassilage/Gülle-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2030*
Rutenhirse-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2030
Maissilage-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
Grassilage/Gülle-Biogas-BHKW-2030*
Rutenhirse-Biogas-BHKW-2030
Maissilage-Biogas-BHKW-2005
Pflanzenöl
Raps-Pflanzenöl-BHKW-2005
Jatropha(degradiert)-Pflanzenöl-BHKW-2030
Jatropha-Pflanzenöl-BHKW-2030
Ölpalme(degradiert)-Pflanzenöl-BHKW-2005
Ölpalme(Regenwald)-Pflanzenöl-BHKW-2030
-185
Pellets
Stroh-Pellet-Heizung-2005
Restholz-Pellet-Heizung-2005
KUP-Pellet-Heizung-2030
Rutenhirse-Pellet-Heizung-2030
H2
Restholz-Wasserstoff--BrennstZelle(PEM)-PKW-2030
Bio-methan
BioAbfall-Biomethan-PKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-PKW-2005
Restholz-Biomethan-PKW-2030
E.
Stroh-Ethanol-PKW-2030
Bio-diesel
Altfett-Biodiesel-PKW-2005
Stroh-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Restholz-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Elektr.-mobil
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-2005
Restholz-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-elektroPKW-2030
Rutenhirse-Biogas-BHKW-elektroPKW-2030
Bio-methan
Grassilage/Gülle-Biomethan-PKW-2030*
KUP-Biomethan-PKW-2030
Maissilage-Biomethan-PKW-2005
Bio-ethanol
Getreide-Ethanol-PKW-2005
Maiskörner-Ethanol-PKW-2005
Zuckerrohr(degradiert)-Ethanol-PKW-2030
Zuckerrohr-Ethanol-PKW-2005
Pf.-öl
Raps-Pflanzenöl-PKW-2005
-56
Biodiesel
Raps-Biodiesel-PKW-2005
KUP-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Jatropha(degradiert)-Biodiesel-PKW-2030
Jatropha-Biodiesel-PKW-2030
Ölpalme(degradiert)-Biodiesel-PKW-2005
Ölpalme(Regenwald)-Biodiesel-PKW-2030
-257
Reststoffe
Energiepflanzen
Strom
R.
E.
Wärme
Reststoffe
Energiepflanzen
Mobilität
-50
0
30
50
60
100
150
200
Absolute Treibhausgasminderung bezogen auf die Menge an eingesetzter Biomasse (Bruttoenergie)
[t CO2eq / TJ]
Lebenszyklus-Emissionen ohne iLUC
Lebenszyklus-Emissionen mit iLUC bzw. iLUC irrelevant

Beispielsweise könnte in Bezug auf das vom WBGU gewählte Referenzsystem eine Mindestreduktion von 60 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse vorgegeben werden. Dabei sind die Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen einzubeziehen. Als Mindeststandard (Kap. 10.3) hält der WBGU eine Reduktion von 30 t CO_2eq pro TJ für angemessen. Im Biokraftstoffbereich entspricht eine solche Vorgabe in etwa der Anforderung, die Emissionen gegenüber dem Referenzsystem um 50 % bezogen auf die Endenergie zu senken.

Die Sensitivitätsanalyse des Pfades KUP-Biomethan-GuD-2030 zeigt, wie sehr die Vermeidungsleistung der Bioenergiepfade von dem gewählten Referenzsystem dem ersetzten fossilen Energieträger abhängt (Abb. 7.3-5). Wird im Idealfall Strom aus Braunkohle durch Strom aus KUP-Biomethan ersetzt, könnten ohne Berücksichtigung indirekter Landnutzungsänderungen ca. 150 t CO_2eq pro TJ Biomasse eingespart werden. Wird hingegen Strom aus Erdgas ersetzt, sind es nur noch ca. 50 t CO_2eq. Diese Werte verschlechtern sich bzw. werden sogar negativ, wenn Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen einbezogen werden.

Dies verdeutlicht, dass Bioenergie ihre höchste Klimaschutzwirkung vor allem dann entfaltet, wenn sie Kohle ersetzt. Die Vermeidungsleistung von Biomethan ist daher nicht sonderlich hoch, wenn es etwa Erdgas ersetzt, was insbesondere beim Einsatz in Wärmeanwendungen wahrscheinlich ist. Wird jedoch Biomethan explizit zur Stromerzeugung insbesondere zur Verdrängung von Kohlestrom verwendet, erreicht es eine wesentlich höhere Klimaschutzwirkung.

Es ist daher notwendig, entsprechende Standards und geeignete politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen zu schaffen, die bei der Bioenergienutzung eine Substitution von fossilen Energieträgern mit hohen Emissionen wahrscheinlich machen.

Treibhausgasvermeidungskosten

Werden fossile Energieträger durch Bioenergie ersetzt, fallen unter Umständen Mehrkosten an. Setzt man diese Mehrkosten, d.h. die Differenz der spezifischen Gestehungskosten eines Bioenergienutzungspfads und des Referenzpfads ins Verhältnis mit den erzielten Treibhausgasemissionseinsparungen, lassen sich Treibhausgasvermeidungskosten berechnen (Gleichung 7.2-5; Müller-Langer et al., 2008).

Die verwendeten Gestehungskosten der fossilen Referenzsysteme sind in Tabelle 7.3-4 aufgeführt. Abbildung 7.3-6 zeigt die Mehrkosten, die sich durch den Einsatz von Bioenergie verglichen mit dem Referenzsystem pro vermiedener Tonne Treibhausgasemission ergeben. Im Wärme- und Stromsektor ist der Vergleich auf die Endenergie bezogen. Im Verkehrsektor wurde auf die mechanische Nutzenergie Fahrzeugkilometer bilanziert, da nur so ein vollständiger Vergleich zwischen allen untersuchten Mobilitätspfaden möglich ist. In Publikationen, die den Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehr betreffen, wird in der Regel nur bis zur Energie des Kraftstoffs bilanziert, da das verwendete Fahrzeug meist dieselben Charakteristika hat wie das Referenzfahrzeug. Um die Elektromobilität und Brennstoffzellenfahrzeuge mit einbeziehen zu können, wurde in der vorliegenden Studie bis zum Fahrzeugkilometer bilanziert. Auf diese Weise werden sowohl die Mehrkosten als auch die besseren Wirkungsgrade der entsprechenden Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge in die Bilanz einbezogen.

Ergibt sich für die THG-Vermeidungskosten ein negativer Wert, ist die Energiebereitstellung aus Biomasse günstiger als der fossile Referenzfall. Für Bioenergienutzungspfade, bei denen keine Emissions-

Abbildung 7.3-5
Sensitivität der absoluten THG-Minderung bezogen auf die eingesetzte Menge an Biomasse gegenüber dem Referenzsystem anhand des Beispiels der Nutzung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen in Form von Biomethan für ein GuD-Kraftwerk. Es ist jeweils die Vermeidungsleistung ohne (gelb) und mit (grün) Berücksichtigung der Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen für drei verschiedene Referenzsysteme dargestellt. Die höchste Vermeidungsleistung wird erreicht, wenn Braunkohle ersetzt wird, die geringste Vermeidungsleistung bzw. sogar eine Emissionssteigerung ergibt sich, wenn Erdgas substituiert wird.
Quelle: WBGU basierend auf Daten von Fritsche und Wiegmann, 2008 sowie Müller-Langer et al., 2008

Tabelle 7.3-5
Gestehungskosten der fossilen Referenzsysteme, die vom WBGU zur Ableitung der Treibhausgasvermeidungskosten der einzelnen Bioenergienutzungspfade herangezogen werden.
Quelle: Müller-Langer et al., 2008

	Fossiler Referenzfall	Gestehungskosten pro End- bzw. Nutzenergie EUR Cent je kWh_{el} bzw. kWh_{th} bzw. Fzg-km	Anteil am Mix (%)	Referenzwert g $CO_{2\text{-}eq.}$ je kWh_{el} bzw. kWh_{th} bzw. Fzg-km
Strom	Steinkohle-KW	5,20	80	6,2
	Erdgas-GuD	10,0	20	
Wärme	Heizöl-Heizung	10,8	40	11,3
	Erdgas-Heizung	11,6	60	
Mobilität	Benzin-PKW	2,68	60	2,6
	Diesel-PKW	2,58	40	

minderung gegenüber dem Referenzfall erzielt wird, oder sogar eine Steigerung der Emissionen erfolgt, lassen sich keine THG-Vermeidungskosten definieren. Diese Pfade sind mit „keine Minderung" gekennzeichnet.

Zur Einordnung dieser Kosten können zunächst exemplarische Vermeidungskosten anderer Klimaschutzoption betrachtet werden. Etwa werden heutige Kosten für Aufforstung mit ca. 22 US-$ pro t CO_2 angegeben (Kap. 5.5). Andere erneuerbare Energien sind auch geeignete Klimaschutzoptionen mit teilweise deutlich geringern Vermeidungskosten. Windenergie kann in Deutschland im Durchschnitt zu 8 €-ct pro kWh, an günstigen Standorten zu 5 €-ct po kWh, bereitgestellt werden und verursacht im Durchschnitt Emissionen von nur 25 g CO_2eq pro kWh (Durstewitz et al., 2008; Wagner et al., 2008). Daraus ergeben sich im Vergleich zum Referenzsystem (6,16 €-ct pro kWh bei 935 g CO_2eq pro kWh) Vermeidungskosten der Windenergie von 22 € pro t CO_2eq im Durchschnitt und sogar ein Gewinn, d.h. negative Vermeidungskosten von -11 € pro t CO_2eq an sehr guten Standorten. Die Photovoltaik kann in Deutschland im Mittel zu 42 €-ct pro kWh und in südlichen sonnenreichen Ländern bei ca. 25 €-ct pro kWh bei Emissionen von 75 g CO_2eq pro kWh Strom bereitstellen (Wagner et al., 2008; EPIA, 2008). Damit liegen die Vermeidungskosten der Photovoltaik bei ca. 420 € pro tCO_2eq bzw. 220 € pro tCO_2eq. Die Wasserkraft verursacht Gestehungskosten von ca. 6 €-ct pro kWh in Deutschland und global gesehen liegen diese Kosten für die große Wasserkraft bei ca. 4 €-ct pro kWh (Fichtner, 2003). Die Emissionen der Wasserkraft liegen wie die Windenergie bei ca. 25 g CO_2eq pro kWh (Wagner et al., 2007). Strom aus Wasserkraft spart also Kosten ein, d.h. hat sogar negative Vermeidungskosten von bis zu -24 € pro t CO_2eq. Die Treibhausgasbilanz der Wasserkraft ist

$$K_{THG,S} = \frac{K_S - K_{Ref}}{e_{REF} - e_S} = \frac{\Delta K}{\Delta e_{THG}} \quad \text{mit } \Delta e_{THG} > 0$$

Gleichung 7.3-1
$K_{THG,S}$ spezifische THG-Vermeidungskosten eines Settings [EUR/t_{THG}]; K_S spezifische Gestehungskosten eines Settings [EUR/GJ_{EE}]; K_{REF} spezifische Kosten des Referenzsettings (jeweils unter Berücksichtigung der Grenzkosten für fossile Energieträger) [EUR/GJ_{EE}]; ΔK Differenzkosten des Settings gegenüber einem Referenzsetting [EUR/GJ_{EE}]; $e_S$spezifische THG-Emissionen eines Settings [kgTHG/GJ_{EE}]; e_{REF} spezifische THG-Emissionen des Referenzsettings [kgTHG/GJ_{EE}]; Δe_{THG} spezifische THG-Vermeidung des Settings gegenüber einem Referenzsetting [kg_{THG}/GJ_{EE}]

allerdings insbesondere bei Stauseen aufgrund möglicher Methanemissionen mit großen Unsicherheiten behaftet, so dass sich in Einzelfällen deutlich andere Werte ergeben können.

Für die grundsätzliche Bewertung der dargestellten Vermeidungskosten greift der WBGU auf Studien zurück, in denen Grenzschadenskosten des Klimawandels, d.h. aggregierte volkswirtschaftliche Nettokosten, die durch Schäden aufgrund von Klimaänderungen weltweit entstehen (social cost of carbon), ermittelt werden sowie auf Studien der Grenzvermeidungskosten, bei denen sich global ausreichend Emissionsminderungen realisieren lassen, um die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre bei 400 ppm zu stabilisieren. Auf Basis der Zahlen in Studien zu Grenzschadenskosten (Clarkson und Deyes, 2003; Pearce, 2003; UBA, 2007) und zu Grenzkosten verschiedener Vermeidungsoptionen (Enkvist et al., 2007) werden im Folgenden Nutzungspfade in folgende Kategorien eingeordnet: Nutzungspfade mit Vermeidungskosten oberhalb von 60 € pro t CO_2eq werden als gegenwärtig ökonomisch nicht effizient, d.h. als heute zu teuer bewertet, Nutzungspfade mit Vermeidungskosten von 40–60 € pro t CO_2eq werden als ökonomisch akzeptabel eingeschätzt und

Pe.
Stroh-Pellet-KohleKW-2005
Restholz-Pellet-KohleKW-2005
Hs.
Stroh-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2005
Restholz-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2005
Roh-gas
Restholz-Rohgas-BrennstZelle(SOFC)-2030
Restholz-Rohgas-GasTurb-2030
Biomethan
Restholz-Biomethan-GuD-KW-2030
BioAbfall-Biomethan-GuD-KW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-GuD-KW-2030
BioAbfall-Biomethan-BHKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-BHKW-2005
Biogas
BioAbfall-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
BioAbfall-Biogas-BHKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BHKW-2005
Hs. + Pe.
KUP-Pellet-KohleKW-2030
KUP-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2030
Roh-gas
KUP-Rohgas-BrennstZelle(SOFC)-2030
KUP-Rohgas-GasTurb-2030
Biomethan
KUP-Biomethan-GuD-KW-2030
Grassilage/Gülle-Biomethan-GuD-KW-2030*
Rutenhirse-Biomethan-GuD-KW-2030
Maissilage-Biomethan-GuD-KW-2005
Grassilage/Gülle-Biomethan-BHKW-2030*
Rutenhirse-Biomethan-BHKW-2030
Maissilage-Biomethan-BHKW-2005
Biogas
Grassilage/Gülle-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2030*
Rutenhirse-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2030
Maissilage-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005
Grassilage/Gülle-Biogas-BHKW-2030*
Rutenhirse-Biogas-BHKW-2030
Maissilage-Biogas-BHKW-2005
Pflanzenöl
Raps-Pflanzenöl-BHKW-2005
Jatropha(degradiert)-Pflanzenöl-BHKW-2030
Jatropha-Pflanzenöl-BHKW-2030
Ölpalme(degradiert)-Pflanzenöl-BHKW-2005
Ölpalme(Regenwald)-Pflanzenöl-BHKW-2030
Pellets
Stroh-Pellet-Heizung-2005
Restholz-Pellet-Heizung-2005
KUP-Pellet-Heizung-2030
Rutenhirse-Pellet-Heizung-2030
H2
Restholz-Wasserstoff--BrennstZelle(PEM)-PKW-2030
Bio-methan
BioAbfall-Biomethan-PKW-2005
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-PKW-2005
Restholz-Biomethan-PKW-2030
E.
Stroh-Ethanol-PKW-2030
Bio-diesel
Altfett-Biodiesel-PKW-2005
Stroh-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Restholz-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Elektr.-mobil
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-2005
Restholz-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-elektroPKW-2030
Rutenhirse-Biogas-BHKW-elektroPKW-2030
Bio-methan
Grassilage/Gülle-Biomethan-PKW-2030*
KUP-Biomethan-PKW-2030
Maissilage-Biomethan-PKW-2005
Bio-ethanol
Getreide-Ethanol-PKW-2005
Maiskörner-Ethanol-PKW-2005
Zuckerrohr(degradiert)-Ethanol-PKW-2030
Zuckerrohr-Ethanol-PKW-2005
Pf.-öl
Raps-Pflanzenöl-PKW-2005
Biodiesel
Raps-Biodiesel-PKW-2005
KUP-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030
Jatropha(degradiert)-Biodiesel-PKW-2030
Jatropha-Biodiesel-PKW-2030
Ölpalme(degradiert)-Biodiesel-PKW-2005
Ölpalme(Regenwald)-Biodiesel-PKW-2030
Strom
Reststoffe
Energiepflanzen
1474
2337
836
996
1102
Wärme
R.
E.
Mobilität
Reststoffe
Energiepflanzen
1523
-50
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
Treibhausgasvermeidungskosten [€ / t CO2eq]
Lebenszyklus-Emissionen ohne iLUC
Lebenszyklus-Emissionen mit iLUC bzw. iLUC irrelevant
* Keine Minderung

Abbildung 7.3-6
Kosten der Treibhausgasvermeidung durch den Einsatz verschiedener Bioenergienutzungspfade, berechnet nach Gleichung 7.3-1. Als Referenzsystem wurde für die Strompfade ein Mix aus 80 % Steinkohle und 20 % Erdgasnutzung herangezogen, für die Wärmepfade 60 % Erdgas und 40 % Erdöl und für die Mobilitätspfade 60 % Benzin und 40 % Diesel (Tabelle 7.3-3). Die gelben Balken beinhalten die Lebenszyklus-Emissionen inklusive der Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen (dLUC). Die grünen Balken berücksichtigen darüber hinaus Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen (iLUC 50 %; Kasten 7.3-2). Für die Energiepflanzenpfade wurde (wenn nicht anders gekennzeichnet) angenommen, dass der Anbau auf einem Acker erfolgt. Bei der Nutzung von Reststoffen wird nur ein Balken dargestellt, da keine Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen erwartet werden. Negative Werte bezeichnen eine Emissionssteigerung bezüglich des Referenzsystems. * Bei Pfaden, die Grassilage/Gülle als Substrat haben wurde angenommen, dass in Deutschland Grassilage keine Emissionen aus Landnutzungsänderungen verursacht, was aber nicht global übertragbar ist. Die Bezeichnungen der Pfade beziehen sich auf die in den Tabellen 7.2-1 und 7.2-2 aufgelisteten Anbaussysteme und Konversionsverfahren.
Quelle: WBGU basierend auf Daten von Fritsche und Wiegmann, 2008 sowie Müller-Langer et al., 2008

Nutzungspfade mit weniger als 40 € pro t CO_2eq beschreiben nach Ansicht des WBGU den heute kosteneffizienten Bereich. Angesichts von Unsicherheiten, die aus den Modellierungen resultieren, die den Zahlen in den genutzten Studien zugrunde liegen, sind die angegebenen Bereichsgrenzen zwar unter Vorbehalt zu betrachten; sie beschreiben dennoch plausible Korridore für die Bewertung.

Legt man zunächst die heutigen Kosten zugrunde, ergeben sich folgende Schlussfolgerungen: Kostengünstiger Klimaschutz lässt sich heute in erster Linie mit denjenigen Pfaden erreichen, bei denen tropische Energiepflanzen auf marginalem Land angebaut werden. Dies gilt auch für den Einsatz in der Mobilität. Mit Biodiesel aus *Jatropha*, das auf degradiertem Land angebaut wurde, lassen sich durch den Klimaschutz sogar Kosten senken. Darüber hinaus sind diejenigen Pfade günstig, die auf vergleichsweise einfachen Technologien beruhen, wie z.B. die Verwendung von unraffiniertem Pflanzenöl oder die einfache Mitverbrennung von Stroh- oder Restholz-Pellets in Kohlekraftwerken. Etablierte Technologien wie die Mitverbrennung oder auch die Vergärung von Reststoffen in Biogasanlagen zu Biogas oder Biomethan sind günstig und im Vergleich zu anderen Technologien, deren Kernprozess die Vergasung von Biomasse ist (z.B. Fischer-Tropsch(BtL)-Diesel) oder teuere Aggregate verwenden (z.B. Brennstoffzellen), zunächst zu bevorzugen. Diese Technologien haben sehr hohe Gestehungs- und auch Vermeidungskosten und machen die Bioenergiepfade, die diese verwenden, zu einer sehr teueren Klimaschutzoption. Erst wenn diese Kosten in Folge des technologischen Fortschritts gesenkt werden können, kann deren großflächige Einsatz dieser Technologien für den Klimaschutz empfohlen werden.

Da in die Betrachtung Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen einbezogen müssen (blaue Balken), sind heute nur einige wenige Reststoffpfade attraktiv sowie Energiepflanzenpfade, die marginales Land als Teil des Anbausystems verwenden.

Dieses Bewertungsraster ist jedoch nicht gleichzusetzen mit der Empfehlung, diejenigen Technologien, deren Vermeidungskosten als heute zu teuer bewertet werden, nicht weiterzuverfolgen. Vielmehr muss hier eine differenzierte Betrachtung angeschlossen werden, die auf die Gründe der hohen Kosten und auf zu erwartende deutliche Kostenminderungen eingeht

Bei der Betrachtung der Vermeidungskosten muss darüber hinaus berücksichtigt werden, dass sie sehr stark von den Gestehungskosten des Referenzsystems abhängen. Diese liegen beispielsweise bei der Stromerzeugung aus Kohle mit 5,2 €-Cent/kWh_{el} relativ niedrig und bei der Stromerzeugung aus Erdgas fast bei dem doppelten Wert bei 10,0 €-Cent/kWh_{el} (Tab. 7.3-4). Zu beachten ist weiter, dass alle Kosten der Referenzsysteme auf das Basisjahr 2005 bezogen sind, so dass in Zukunft Veränderungen zu erwarten sind. Dabei ist zwischen Technologiekosten und Brennstoffkosten von Bioenergiepfad und Referenzsystem zu unterscheiden, die den größten Einfluss auf die Gestehungskosten haben. Die Technologiekosten werden voraussichtlich in beiden Fällen sinken. Da die relativ alte konventionelle fossile Technologie in Ihrem Entwicklungsstand weit fortgeschritten ist, werden die Kostensenkungspotenziale geringer ausfallen als bei den z.T. relativ neuen Technologien zur Bioenergienutzung.

Bei den Brennstoffkosten kann sich ein anderes Bild ergeben. Im Vergleich zum Referenzjahr 2005 ist in Deutschland der Brennstoffpreis für Import-Steinkohle von 65 € pro t innerhalb von 3 Jahren bis 2008 um ca. 50 % auf 95 € pro t angestiegen (Müller-Langer et al, 2008; Statis, 2008). Allerdings sind auch die Brennstoffpreise für Biomasse gestiegen, u.a. da sie mit denen der fossilen Energieträger positiv korreliert sind (Kap. 5.2.5.2). Ob die Vermeidungskosten von Bioenergiepfaden tatsächlich durch ansteigende fossile Energiepreise sinken, hängt davon ab, wie stark sich die Technologie- und Brennstoffkosten ändern und in welchem Verhältnis beide auf die Gestehungskosten einwirken. Im Falle der Energiepflanzen können die Brennstoffkosten zusätzlich durch die zunehmenden Landnutzungskonkurrenzen sowie durch gestiegene Inputkosten (Landmaschinen, Dünger, Wasser usw.) steigen, während

die Preise für Reststoffe davon weniger nach oben getrieben werden. In diesem Punkt unterscheidet sich die Bioenergie auch von anderen erneuerbaren Energien: Während bei Wind- und Solarenergie über die Lernkurven mit einer weiteren Kostensenkung in der Zukunft gerechnet werden kann, ist dieses Konzept bei der Bioenergie nur auf die Technologie anwendbar, nicht aber auf die Energieerzeugung selbst, da hier zusätzlich die Brennstoffkosten der Biomasse zu Buche schlagen, die ein bestimmender Faktor der Gestehungskosten sind.

Aus Sicht des WBGU sind bei der Elektromobilität sowie bei den Vergasungstechnologien zur Produktion von Biomethan zukünftig deutliche Kostensenkungen zu erwarten (Kap. 7.2), die sich auch in einer deutlichen Reduktion der Treibhausgasvermeidungskosten beim Einsatz dieser Technologien niederschlagen dürften. Der WBGU schätzt diese Technologien daher neben den heute schon kostengünstigen Vermeidungsoptionen als vielversprechende Klimaschutztechnologien ein.

Optimale Einbindung und Nutzung der Bioenergie in Energiesystemen 8

Bioenergie ist neben der Sonnenenergie die am längsten vom Menschen genutzte Energiequelle. Dagegen beschränkt sich die exzessive Nutzung fossiler Energie auf ein vergleichsweise kleines Zeitfenster von zwei bis drei Jahrhunderten. Nicht nur die Knappheit fossiler Energieträger macht aber eine Energiewende unumgänglich. Ihre Nutzung verursacht den größten Anteil anthropogener Treibhausgasemissionen, die zu einem gefährlichen Klimawandel führen (IPCC, 2007d). Für den Klimaschutz und die Überwindung der Energiearmut hat der Umbau der Energiesysteme zu einer nachhaltigen Energieversorgung daher höchste politische Priorität (Kap. 2).

Die Strukturen der Energieversorgung unterscheiden sich zwischen Industrie- und Entwicklungsländern deutlich. In Schwellenländern wie China und Indien ist sowohl traditionelle Energieversorgung auf Basis von Biomasse als auch fossile Energieversorgung anzutreffen. In über 75 Ländern ist Bioenergie die Hauptenergiequelle, in über 50 Ländern beträgt ihr Anteil an der Energieversorgung sogar mehr als 90 % (IEA, 2006b). Bei diesen Ländern handelt es sich fast ausschließlich um Entwicklungsländer, die Biomasse auf traditionelle Weise nutzen. Mit relativ geringem technischen und finanziellen Aufwand kann die Effizienz der Biomassenutzung stark verbessert und auch der Treibhausgasausstoß deutlich verringert werden (Kap. 8.2). Auch in Industrieländern kann Bioenergie zu Klimaschutz und technischer Versorgungssicherheit zukünftiger, auf erneuerbarer Energie basierender Energiesysteme beitragen (Kap. 8.1).

8.1 Bioenergie als Teil einer nachhaltigen Energieversorgung in Industrieländern

8.1.1 Die notwendige Transformation der Energiesysteme für mehr Energieeffizienz und Klimaschutz

Um die 2°C-Leitplanke (Kap. 3) einzuhalten, ist eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre unterhalb von 450 ppm CO_2eq notwendig. Mit 56,6 % bzw. 28 Gt hatten die CO_2-Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger im Jahr 2004 den größten Anteil an den globalen Treibhausgasemissionen. Um eine Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgasemissionen zwischen 445 und 490 ppm CO_2eq zu erreichen, müssen die globalen Treibhausgasemissionen bis 2050 um 50–85 % gegenüber 2000 reduziert werden. Studien zur Verteilung von Emissionsminderungspflichten auf die verschiedenen Staaten zeigen, dass eine Stabilisierung bei 450 ppm CO_2eq erreichbar ist, wenn bis 2020 die Emissionsrechte der Industriestaaten 25–40 % unter den Emissionen von 1990 liegen, und gleichzeitig in den Schwellenländern die Emissionen gegenüber den Projektionen erheblich gesenkt werden. Bis zum Jahr 2050 müssen die Emissionsrechte der Industrieländer 80–95 % unter den Emissionen von 1990 liegen, und in allen anderen Regionen müssen die Emissionen gegenüber den Projektionen erheblich gesenkt werden (IPCC, 2007c). Diese Ziele können in Industrieländern und industrialisierten Regionen der Schwellenländer durch Energieeinsparung und mit Hilfe erneuerbarer Energien wie etwa Biomasse erreicht werden. Dafür ist eine gezielte Umgestaltung der Energiesysteme notwendig.

Abbildung 8.1-1
Effizienzgewinn durch den Umstieg auf erneuerbare Energien, bei denen aus Solar-, Wasser- und Windenergie direkt Strom erzeugt wird. Bei der konventionellen Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern ohne Wärmeauskopplung kann im globalen Durchschnitt nur gut ein Drittel der Primärenergie in Strom gewandelt werden, während knapp zwei Drittel als Abwärme ungenutzt bleiben. Beim Umstieg auf erneuerbare Energien aus Direkterzeugung sinken daher bei gleicher Stromerzeugung der Primärenergiebedarf und die energiebedingten CO_2-Emissionen.
Quelle: WBGU

8.1.1.1 Bausteine der Transformation

Die Transformation basiert auf Ausbau und verstärktem Einsatz erneuerbarer Energien in Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplung, der Vermeidung von Abwärme im Verkehrssektor, der Nutzung der Umgebungswärme zur Wärmebereitstellung sowie Energieeinsparmaßnahmen in allen Sektoren. Im Folgenden werden die einzelnen Bausteine erläutert.

Effizienzgewinne durch verstärkte Direkterzeugung von Strom aus Solar-, Wasser- und Windenergie

Strom wird heute zum größten Teil aus fossilen Energieträgern gewonnen. Bei der Umwandlung entstehen große Mengen an CO_2. Die im Brennstoff enthaltene Energie kann in den überwiegend betriebenen Großkraftwerken nur zu ca. einem Drittel in Strom gewandelt werden, während der Rest als Abwärme ungenutzt bleibt, sofern keine Wärme ausgekoppelt wird (BP, 2008). Direkt erzeugter, erneuerbarer Strom aus Wasser-, Solar- und Windenergie hingegen vermeidet die Abwärmeverluste der thermischen Energiewandlung und trägt somit entscheidend zur Steigerung der Energieeffizienz bei (Abb. 8.1-1).

Mit zunehmender regenerativer Direkterzeugung reduzieren sich der fossile Primärenergiebedarf zur Stromproduktion und proportional dazu der damit verbundene Treibhausgasausstoß (Kap. 4.1; Kasten 4.1-1).

Effizienzgewinn durch den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) trägt dazu bei, fossile und biogene Brennstoffe besser auszunutzen und dadurch Treibhausgasemissionen zu vermeiden. Durch die Nutzung der Abwärme über Nah- und Fernwärmenetze als Raum- oder Prozesswärme werden Energieträger eingespart und damit der Primärenergieaufwand im Wärmesektor reduziert. Durch die Nutzung der hohen Potenziale für industrielle KWK und durch die geschickte Planung und Standortfindung für neue Heizkraftwerke sowie einem verstärkten Ausbau von Wärmenetzen kann der Anteil der KWK zugunsten von Klimaschutz und Energieeffizienz erhöht werden (Abb. 8.1-2).

Effizienzgewinn durch den Umstieg auf Elektromobilität

Das gegenwärtige Mobilitätskonzept und die dazugehörige Verkehrsinfrastruktur weisen große Ineffizienzen auf: Im konventionellen Antriebskonzept mit einem Verbrennungsmotor können im Mittel nur 20 % der fossilen Energie in Antriebsenergie gewandelt werden (ermittelt nach dem neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ). Die restliche Energie geht bis auf einen Bruchteil für die Heizung des Fahrzeugs als ungenutzte Abwärme an die Umgebung verloren. Viel effizienter ist der Antrieb mittels Elektromotor, der ca. 80 % der gespeicherten Energie (Strom) als mechanische Antriebsenergie nutzbar macht.

Die Effizienz des Elektroantriebes von 80 % (Steckdose zu Rad) ergibt sich wie folgt: Im Elektroauto wird der Strom über einen Gleichrichter mit einer Effizienz von 95 % in einer Lithiumbatterie gespeichert und bei der Fahrt über einen Wechselrichter mit derselben Effizienz zurück in Wech-

Abbildung 8.1-2
Transformation des Stromsektors. Zwei wesentliche Bausteine tragen zum Effizienzgewinn im Stromsektor bei: Der Ausbau der Direkterzeugung von regenerativem Strom und die verstärkte Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung. Die Abwärme aus thermischer Stromerzeugung kann zum Großteil durch die Kraft-Wärme-Kopplung nutzbar gemacht werden. Gleichzeitig nimmt der Anteil des direkt erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien zu und ersetzt einen Teil des Stroms, der sonst durch Verbrennung fossiler oder biogener Energieträger bereitgestellt werden würde.
Quelle: WBGU

selstrom gewandelt, der einen Elektromotor mit einem Wirkungsgrad von ca. 95 % antreibt. Moderne Lithiumbatterien weisen eine Speichereffizienz von bis zu 95 % auf. Im Vergleich zum konventionellen Antriebskonzept ist der Elektroantrieb damit viermal so effizient. Dieser Faktor läge immer noch bei 3, wenn ein in Zukunft erzielbarer optimistischer Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors von 25 % und für den Elektroantrieb von 75 % angenommen wird. Selbst bei Einbeziehung des höheren Fahrzeugsgewichts durch die schweren Lithiumbatterien liegt der Faktor der Effizienzsteigerung immer noch bei ca. 2 –2,5.

Bisher wird dieser Vorteil allerdings nicht genutzt, weil die Herkunft des Stroms für die Gesamteffizienz entscheidend ist und etwa ein mit einem schlechten Wirkungsgrad erzeugter fossiler Strom den energetischen Vorteil des Elektroantriebs wieder vernichtet. Erst ab einem gewissen Wirkungsgrad der Stromwandlung ist der Einsatz der Elektromobilität technisch effizienter als die herkömmliche Antriebtechnik (Abb. 8.1-3). Deutlich wird dies in der Kombination des in Abbildung 8.1-1 dargestellten Wirkungsgrads der konventionellen Stromerzeugung von 38 % mit dem Wirkungsgrad eines Elektromobils von 80 %: der Gesamtwirkungsgrad beträgt dann lediglich gut 30 %, was nur leicht über dem Wert der herkömmlichen Antriebstechnik liegt. Wird jedoch die Wärme durch KWK genutzt, so dass sich ein energetischer Wirkungsgrad in der Stromerzeugung von 80 % ergibt, ist der Brennstoffnutzungsgrad in der Elektromobilität in jedem Falle höher als in Verbrennungskraftfahrzeugen. Letztendlich schöpft nur die Kombination von Elektroantrieb und direkt erzeugtem, erneuerbarem Strom aus Solar-, Wasser- und Windenergie das Effizienzpotenzial der Elektromobilität voll aus (Abb. 8.1-4).

Die Elektromobilität hat weitere entscheidende Vorteile gegenüber dem konventionellen Antriebskonzept: Der thermische Wandlungsprozess findet nicht im Fahrzeug, sondern stationär statt. Die Abwärme wird nutzbar und eine CO_2-Sequestrierung ist perspektivisch möglich. Ebenso wird dadurch die Feinstaubproblematik gelöst und die Lärmbelastung reduziert. Interessant ist die Elektromobilität auch für Energieerzeuger und Netzbetreiber. Sie stellt einen bis zu 90 % des Tages verfügbaren Energiespeicher dar (Standzeit des Fahrzeugs), der über geeignete Informations- und Kommunikationstechnologien eingebunden und zum Ausgleich fluktuierender Einspeisung erneuerbarer Energien verwendet werden kann. Die Vermeidung der Umwandlungsverluste bei Verbrennungsmotoren und der Einsatz von direkt erzeugtem Strom in Elektromobilen stellen so ein erhebliches Effizienzpotenzial im Verkehrssektor dar. Regenerative Elektromobilität, d.h. bei der der verwendete Strom aus erneuerbaren Energiequellen kommt, ist daher ein wesentlicher Baustein in der Transformation des Energiesystems zur Nachhaltigkeit.

Diese Aussagen beziehen sich in erster Linie auf den Straßenverkehr, der den größten Anteil am Energieverbrauch im Verkehrssektor hat. Der flächendeckende Einsatz von Elektrofahrzeugen kann aber erst in einem längeren Zeitraum realisiert werden (Abb. 8.1-5). Noch befindet sich der Elektroan-

Abbildung 8.1-3
Effizienzvergleich zwischen der Nutzung fossiler bzw. biogener Kraftstoffe im Verkehr und der Elektromobilität. Im konventionellen Antriebskonzept von Fahrzeugen wird ca. ein Fünftel der getankten chemischen Energie in mechanische Antriebsenergie gewandelt. Beim Elektroantrieb können bis zu 80 % der „getankten" elektrischen Energie in den mechanischen Vortrieb umgesetzt werden. Entscheidend für den gesamten Effizienzgewinn ist jedoch die Art der Stromerzeugung. Der Effizienzgewinn stellt sich bei Kraftwerkswirkungsgraden über 25 % ein – in der Abbildung ist der für Kraftwerke typische Bereich von 30–60 % eingetragen. Die Elektromobilität lohnt sich aber in jedem Fall, wenn die Abwärme im Kraftwerk genutzt wird. Da dies im konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor nicht möglich ist, können dort nur 20% des fossilen Brennstoffes als mechanische Antriebsenergie genutzt werden (horizontale Linie „Fossile Kraftstoffe").
Im Fall der Biokraftstoffe verringert sich dieser Wert auf 10 %, da bei der Konversion von Biomasse zu Kraftstoff im besten Fall (2. Generation Biokraftstoffe) nur die Hälfte der Bioenergie in Kraftstoff gewandelt werden kann (horizontale Linie „Biokraftstoffe 2. Gen."). Das maximale Effizienzpotential erreicht die Elektromobilität, wenn sie mit direkt erzeugtem Strom aus Wasser-, Solar- oder Windenergie gespeist wird (rechte Säule). Hierbei werden die hohen thermischen Wandlungsverluste vermieden.
Quelle: WBGU

Abbildung 8.1-4
Effizienzgewinn im Verkehr: Energieaufwand und Effizienz eines herkömmlichen Antriebskonzepts mit fossilen und biogenen Kraftstoffen im Vergleich mit einem Elektroantrieb, der regenerativen, direkt erzeugten Strom aus Wasser-, Solar- und Windenergie nutzt. Dieselbe mechanische Antriebsenergie kann um ein vielfaches effizienter über eine regenerative Elektromobilität bereitgestellt werden, als über den Einsatz von Kraftstoff im konventionellen Verbrennungsmotor.
Quelle: WBGU

Abbildung 8.1-5
Transformation des Verkehrssektors: Baustein regenerative Elektromobilität. Durch die zunehmende Nutzung regenerativen Stroms, davon ein großer Anteil aus der Direkterzeugung mittels Wind-, Wasser- und Solarenergie, können der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen im Verkehrsektor erheblich reduziert werden – im Idealfall auf ein Viertel des derzeitigen Energiebedarfs. Quelle: WBGU

trieb für Serienfahrzeuge bis auf Hybridfahrzeuge im Entwicklungsstadium. Eine Schwachstelle ist vor allem die Batterie, die viel Energie speichern, dabei leicht sein und eine lange Lebensdauer haben soll. Dennoch werden elektrische Fahrzeuge mit Reichweiten von 100–200 km heute bereits produziert und viele Automobilhersteller planen Elektro- und Hybridfahrzeuge für ihre Flotte (Engel, 2007). Mittelfristig kann jedoch sogar mit Elektroantrieben im Schwertransport gerechnet werden. Im Flugverkehr gibt es derzeit allerdings keine Alternative zu flüssigen, kohlenstoffbasierten Energieträgern. Ähnlich ist es im Schiffsverkehr, wobei neue Antriebskonzepte wie lenkbare Zugdrachen den Treibstoffverbrauch eines Schiffes um 10–50 % reduzieren können. Prototypen werden bereits eingesetzt (Skysails, 2008). Der Schienenverkehr wird in vielen Ländern bereits überwiegend elektrisch betrieben und aus einem eigenen Stromnetz gespeist (Oeding et al., 2004; DB, 2008). In Österreich betrug 2007 der Wasserkraftanteil an der Bahnstromversorgung bereits 89 % (ÖBB, 2008). Wenn es gelingt, in Zukunft durch Elektromobilität im Individualverkehr kein Erdöl mehr zu verbrauchen, kann das Öl – bis Alternativen gefunden sind – in anderen Traktionssegmente wie Flug-, Fern- und Schiffsverkehr zur Überwindung großen Strecken eingesetzt werden.

Effizienzgewinn durch die Nutzung von Elektrowärmepumpen zur Wärmebereitstellung

Konventionelle Feuerungsanlagen (Öl- und Gasheizungen) haben einen Wirkungsgrad von 70–110 %, bezogen auf den unteren Heizwert H_u (Brennwerttechnik; BHD, 2008; DIN, 1990). Durch direkte Verbrennung in Öl- und Gasheizungen kann gespeicherte Energie zu 100 % in Wärme und nahezu zu 100 % in Nutzwärme (Warmwasser, Raumwärme usw.) gewandelt werden. Deutlich mehr Wärme kann Strom über eine Elektrowärmepumpe liefern, die die verfügbare Umgebungswärme auf ein geeignetes Niveau anhebt und günstig nutzbar macht. Der Quotient von nutzbarer Wärmeleistung zur aufgenommenen Arbeitsleistung des Verdichters wird als Leistungszahl ε bezeichnet und nach definierten Bedingungen nach verschiedenen Normen wie beispielsweise EN 14511 bestimmt (DIN, 2008a und b; VDI, 2008). Bei einer angenommenen durchschnittli-

Abbildung 8.6-1
Effizienzgewinn durch die Nutzung der Umgebungswärme mit Wärmepumpen, die mit regenerativem Strom betrieben werden. Quelle: WBGU

Abbildung 8.1-7
Transformation des Wärmesektors: durch den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung und die verstärkte Nutzung von Elektrowärmepumpen kann in Zukunft der Prozess- und Heizwärmebedarf vollständig gedeckt werden. Um das Effizienzpotenzial von Elektrowärmepumpen voll auszuschöpfen, sollte der Strom zunehmend aus regenerativen Quellen der Direkterzeugung (Wasser-, Solar- oder Windenergie) kommen.
Quelle: WBGU

chen Leistungszahl der Elektrowärmepumpe von 3,5 können mit 1 kWh Strom 3,5 kWh Wärme bereitgestellt werden, wovon 2,5 kWh aus der Umgebungswärme stammen (Baumann et al., 2006). Dieser Wert kann insbesondere bei mit Erdwärme gekoppelten Wärmepumpen erreicht werden. Unter günstigen Bedingungen können damit Wärmepumpen hohe Jahresarbeitszahlen erreichen. Wie bei der Elektromobilität ist die Herkunft des Stroms bzw. der Wirkungsgrad der Stromerzeugung entscheidend. Erst ab einem gewissen Kraftwerkswirkungsgrad ist der Einsatz von Elektrowärmepumpen sinnvoller als die direkte thermische Nutzung des Brennstoffes, was an folgendem Beispiel verdeutlicht wird.

Aus 1 kWh fossiler oder biogener Energie können beim heutigen Kraftwerksmix mit einem Wirkungsgrad von etwa 30–35 % ca. 0,30 kWh Strom erzeugt werden, der in der Elektrowärmepumpe mit der angenommenen Leistungskennzahl maximal das 3,5-fache an Wärme liefert, d.h. ca. 1 kWh Wärme. Hier ist der Einsatz von Elektrowärmepumpen sinnlos, weil die direkte Verbrennung des fossilen oder biogenen Brennstoffes den gleichen Nutzen bringt. Der Nutzwärmegrad steigt jedoch auf ca. 200 % bei Strom aus GuD-Kraftwerken mit Wirkungsgraden von ca. 60 % und sogar auf 350 % bei der Nutzung von direkt erzeugtem Strom aus Solar-, Wasser- und Windenergie. Demnach kommt die Energieeffizienz der Elektrowärmepumpen am besten durch den Einsatz von direkt erzeugtem Strom zum Tragen (Abb. 8.1-6 und 8.1-7). Über einen thermischen Wärmespeicher lässt sich der Strombedarf vom Wärmebedarf entkoppeln. Damit wird ein effizientes Lastmanagement möglich, bei dem z.B. in Zeiten hoher Windenergieaufkommen der anfallende überschüssige Strom auf diese Weise gespeichert wird. Durch den beobachteten Trend eines zunehmend höheren Anteils der Direkterzeugung aus erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung verbessert sich die energetische Gesamteffizienz von elektrischen Wärmepumpen in Zukunft deutlich.

Eine breite Einführung von Wärmepumpen reduziert den Verbrauch fossiler und biogener Brennstoffe im Wärmesektor drastisch. In Kombination mit Abwärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung kann der fossile Primärenergiebedarf und somit der Treibhausgasausstoß im Wärmesektor stark zurückgefahren und direkt zu verbrennende Energieträger im Idealfall ersetzt werden (Abb. 8.1-7). Raumwärme, Warmwasser und ein Teil der Prozesswärme können auf diese Weise geliefert werden. Ein weiterer Teil der Prozesswärme kann durch regenerativen Strom bereit gestellt werden.

Effizienzgewinn durch Energieeinsparmassnahmen

Es gibt viele Wege, die Nutzung von Energie effizienter zu gestalten bzw. den Energieaufwand für den gleichen Nutzen zu senken. In allen Energiesektoren können solche Maßnahmen durchgeführt werden. Sehr anschaulich wird dies im Wärmebereich: Durch Wärmedämmung bis hin zur Passivhausbauweise kann der Energiebedarf für Heizen drastisch reduziert werden. Verbesserte Heizungsanlagen, Herde und Warmwassernutzung sind weitere Beispiele.

Auch im Stromsektor greifen viele Maßnahmen. Beispielsweise wird Druckluft in industriellen Prozessen häufig sehr ineffizient eingesetzt. Durch verbesserte Dichtungen und den Austausch undichter Komponenten kann Kompressorstrom eingespart werden. Ein weiteres Beispiel sind Energieeinsparungen in der Beleuchtung. Ein Industrieland wie

Deutschland wendet dafür zwar nur 5 % des Stromverbrauchs auf, allerdings wird in konventionellen Glühbirnen 95 % davon ungenutzt als Abwärme verschwendet. Würden in jedem der 39 Mio. deutschen Haushalte 75-Watt-Standardglühbirnen durch Energiesparlampen der gleichen Lichtstärke (15 Watt) ersetzt, könnten theoretisch 2,3 GW Kraftwerksleistung, also zwei große Kraftwerke, während der Zeit des Lichtbedarfs abgeschaltet werden. Alle Haushaltsgeräte (Kühl- und Gefrierschränke, Herde usw.), Beleuchtung (LED-Technik) und industrielle Prozesse (elektrische Antriebe, Leistungselektronik, usw.) können noch effizienter gestaltet werden und den gleichen Zweck mit geringerem Stromverbrauch erfüllen. Das Abschalten von Standby-Schaltungen durch den Einbau schaltbarer Steckdosen oder sogar Verbot der Stand-By Schaltungen sind weitere Maßnahmen, die der Energieeffizienz dienen.

Im Verkehr lässt sich der Energieverbrauch aller Flug- und Fahrzeuge durch die Verbesserung der Aerodynamik und die Reduzierung des Gewichts oder Rollwiderstands reduzieren. Auch durch sozioökonomische und organisatorische Maßnahmen in Form einer besseren Ausgestaltung des ÖPNV, einer besseren Auslastung von Bussen, Zügen und Flugzeugen oder auch einer verbesserten Organisation des Verkehrsflusses kann dieses Ziel erreicht werden. Für alle quantitativen Einsparpotenziale ist der betrachtete Zeitraum ausschlaggebend.

Abbildung 8.1-8
Die Transformation des Energiesystems am Beispiel des Industrielands Deutschland: Mit fünf Bausteinen lassen sich Energie- und Klimaeffizienz verwirklichen. Der Primärenergiebedarf ohne den nicht energetischen Anteil wie Erdöl für die chemische Industrie belief sich in Deutschland in 2005 auf 13,4 EJ, wovon 34 % auf den Stromsektor, 44 % auf den Wärmesektor und 23 % auf den Verkehr entfielen. Wird der Endenergiebereich betrachtet, ergeben sich andere Verhältnisse: der Stromanteil wird kleiner (18 %) und die beiden anderen Bereiche entsprechend größer (Wärme 54 %, Verkehr 28 %). Im Verkehr wird auch Strom eingesetzt, der derzeit jedoch nur einen Anteil von 2 % im Verkehrssektor ausmacht und daher in der Darstellung nicht berücksichtigt wird. Zukünftig soll die Direktverbrennung für die Wärmenutzung durch Wärme aus KWK und Elektro-Wärmepumpen ersetzt werden. Der Wärmeanteil, der aus Strom gewonnen wird, einschließlich der Wärme aus der KWK, ist im Diagramm in der Stromerzeugung enthalten. Strom soll zu über 70 % aus der Direkterzeugung durch Solar-, Wasser- und Windenergie gewonnen werden. Für das Lastmanagement der fluktuierenden Energiequellen sollen neben einem massiv ausgebauten Stromtransport- und -verteilungsnetz und der Anbindung von Speicherkraftwerken (Wasser, Druckluft) sowohl der Verkehrssektor (elektrisch angetriebene Fahrzeuge) als auch die Wärmenutzung über Wärmepumpen zur Verfügung stehen, welche über ein breit ausgebautes Informationsnetz angebunden sind (intelligente Stromversorgung – smart grids). Zusammen soll die Stromnutzung im Wärme- und Verkehrssektor 25 % der elektrischen Energieversorgung betragen. Bis 2050 ist eine solche Transformation vorstellbar, die eine ökologische und wirtschaftliche Energieversorgung in Industrieländern möglich macht.
Quelle: WBGU unter Verwendung von Daten aus BMWi, 2008

8.1.1.2
Transformation des Energiesystems durch Kombination der Bausteine

Werden alle fünf beschriebenen Maßnahmen kombiniert, kann der fossile und nukleare Primärenergiebedarf eines Industrielands um mehr als 80 % reduziert und der energiebedingte Treibhausgasausstoß entsprechend gesenkt werden. Dies entspricht den Reduktionsanforderungen, die sich aus einer Fortschreibung des Kioto-Protokolls für Annex-I-Länder wie Deutschland ergeben könnten. Mengenmäßig relevante Treibhausgasemissionen kommen im transformierten Energiesystem nur noch aus der fossilen und biogenen Stromerzeugung in der Kraft-Wärme-Kopplung bzw. aus hocheffizienten GuD-Kraftwerken. Die sehr geringen Emissionen aus Wind- und Wasserkraft bzw. Sonnenenergie sind im Vergleich dazu vernachlässigbar.

Die fünf Bausteine Durchführung von Energieeinsparmaßnahmen, Direkterzeugung von Strom aus Solar-, Wasser- und Windenergie, Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, Umstieg auf regenerative Elektromobilität und Nutzung von Elektrowärmepumpen führen zum Ziel der Effizienzsteigerung im Energiesystem, die keine entfernte Vision sein muss, sondern durchaus einen mit heutiger Technologie erreichbaren Weg darstellt (Abb. 8.1-8). Dadurch kann der energiebedingte Treibhausgasausstoß drastisch durch die Reduktion des Verbrauchs fossiler Primärenergie gesenkt werden.

8.1.2
Die Rolle der Bioenergie in der nachhaltigen Energieversorgung von Industrieländern

Das Potenzial der nachhaltig verfügbaren Bioenergie ist begrenzt (Kap. 6). Es ist absehbar, dass es nicht ausreichen wird, um einen größeren Anteil des heutigen Weltenergiebedarfs zu decken. Daher ist es wichtig, die strategischen Eigenschaften der beschränkt vorhandenen Biomasse optimal zu nutzen (Kap. 2). In Industrieländern ist ihr Einsatz dort zu empfehlen, wo ihre spezifischen Eigenschaften nicht durch andere Energieträger ersetzt werden können und ihr Nutzen in Bezug auf Energieeffizienz und Klimaschutz am größten ist, ohne dass andere Nachhaltigkeitskriterien wie der Erhalt der Biodiversität und die Ernährungssicherheit gefährdet werden. Im Folgenden werden die drei potenziellen Haupteinsatzgebiete Verwendung als Treibstoff im Verkehr, Wärmebereitstellung und Stromerzeugung näher betrachtet.

8.1.2.1
Bioenergie im Verkehr – Biostrom versus Biokraftstoffe

Herausforderung Rohstoff

Der Rohstoff Energieträger ist in allen Energiesektoren ein Problem. Der Verkehrsektor ist heute fast ausschließlich von fossilem Erdöl abhängig und speist sich beispielsweise in Europa zu ca. 98 % aus Erdöl, in vielen anderen Regionen ist die Abhängigkeit ähnlich hoch (Boerrigter, 2004). Fossile Kraftstoffe werden immer knapper und teurer, worauf die aktuelle Ölpreisentwicklung hinweist. Ein möglicher Ausweg wird über Biokraftstoffe gesucht, deren relevantes Potenzial jedoch an verfügbare Flächen gebunden ist (Kap. 6 und 7). Synthetische Biokraftstoffe der 2. Generation versprechen zwar eine höhere Energieausbeute als Biokraftstoffe der 1. Generation. Ihre Ökobilanz ist jedoch nicht wesentlich besser als die der ersten Generation und, wie alle Ergebnisse der Bilanzierung für Energiepflanzen, deutlich von den direkten und indirekten Landnutzungsänderungen abhängig (Kap. 7.3; Jungbluth et al., 2008). Neben den Flächen für Energiepflanzen ist auch die Menge der zu verwertenden Reststoffe limitiert. Ab Mitte des Jahrhunderts wird zudem die stoffliche Nutzung von Pflanzen weiter zunehmen, wenn Erdöl für die chemische Industrie unwirtschaftlich wird und andere Kohlenwasserstoffe verwendet werden müssen. Biokraftstoffe können das Klimaproblem nicht lösen und auch in der Versorgungssicherheit nur eine Brückenfunktion erfüllen. Sowohl die Nahrungs- und Futtermittelproduktion als auch bestimmte Industriezweige (Chemie, Bau, Textilien usw.) benötigen Kohlenstoffverbindungen. Energie für Mobilität kann hingegen auch auf anderen Wegen bereitgestellt werden.

Effizienter Einsatz von Bioenergie im Verkehr

Neben der Rohstoffverfügbarkeit ist für den Verkehr auch der Wirkungsgrad der Konversion entscheidend für den energetischen Beitrag der Biomasse. Die Konversion von Biomasse in Biokraftstoffe führt im Vergleich zur Konversion in Strom für Elektromobile zu deutlich geringeren Gesamtwirkungsgraden (Kap. 7.2–7.4). Es ist deshalb energetisch sinnvoller, Biomasse in der Kraft-Wärme-Kopplung einzusetzen, als sie in Kraftstoff umzuwandeln, wie am Beispiel holzartiger Biomasse deutlich wird: Der Aggregatzustand des festen Brennstoffs wird unter Energieverlusten von bis zu 60 % zweimal geändert und der gewonnene Kraftstoff im Verbrennungsmotor eingesetzt, so dass am Ende nur ca. 10 % der Energie als Nutzenergie am Rad zur Verfügung stehen (Abb. 8.1.9). Im Vergleich dazu kann Biomasse effi-

Abbildung 8.1-9
Vergleich verschiedener Konversionspfade im Verkehrssektor im Bezug auf die am Rad nutzbare mechanische Energie. In dieser Darstellung werden nur die Hauptenergieströme betrachtet. Nebenprodukte wie die Nutzwärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung oder stoffliche Produkte wie Dünger oder Tierfutter werden nicht berücksichtigt. Im besten Fall können ca. 75 % der Primärenergie aus Wasser-, Wind- und Solarenergie als Antriebsenergie im Elektrofahrzeug genutzt werden, im schlechtesten Fall nur gut 5 % der Primärenergie von Raps im Verbrennungsmotor. Bei der Herstellung von Biodiesel aus Raps wird die Rapssaat vom Rapsstroh getrennt, wobei ca. 50 % der chemischen Energie der Pflanze für die Kraftstoffproduktion verloren geht. Aus der Saat können ca. 60 % der Energie als Rapsöl extrahiert und das Öl zu 90 % in Biodiesel verestert werden, so dass im Ganzen ca. 25 % der Energie der Pflanze als Biodiesel getankt werden, wovon im Verbrennungsmotor nur 20% in Antriebsenergie umgesetzt werden. Es werden also nur gut 5 % der ursprünglichen Energie der Pflanze als Antriebsenergie genutzt. Bei Biokraftstoffen der 2. Generation ist die Bilanz nicht wesentlich besser. Es kann zwar die ganze Pflanze genutzt und zu ca. 85 % in Rohgas gewandelt werden, jedoch treten in der Gasaufbereitung und der Synthese hohe Wandlungsverluste auf, so dass nur ca. 45 % der ursprünglich in der Pflanze enthaltenen Energie als Fischer-Tropsch-Diesel getankt bzw. nur ca. 10% der Pflanze als Antriebsenergie genutzt werden kann. Wird das Rohgas auf dem gleichen Pfad zu Biomethan gewandelt und in effizienten GuD-Kraftwerken verstromt, können gut 45 % der Energie als Strom im Elektromobil getankt werden, welches mit einer Effizienz von 80 % im Ganzen gut 35 % der ursprünglichen Energie der Pflanze als Antriebsenergie nutzen kann.
Quelle: WBGU, unter Verwendung von Berechnungen aus Ahmann, 2000; Dreier und Tzscheutschler, 2000; Kaltschmitt und Hartmann, 2003; EAA, 2007; Engel, 2007; Sterner, 2007

zient verstromt (stationäre Energiewandlung, Volllastbetrieb), die Abwärme genutzt und der Strom im Elektromobil sauber und leise eingesetzt werden. In Abbildung 8.1-9 sind exemplarisch vier Nutzungspfade für den Fahrzeugantrieb gegenübergestellt. Ausgehend von 100 % Primärenergie (Energieinhalt der Gesamtpflanze bei der Ernte) steht für den Vortrieb am Rad bei der Biokraftstoffnutzung deutlicher weniger Energie zur Verfügung, als dies über den Pfad der Elektromobilität möglich ist. Zum Vergleich ist die direkte sehr effiziente Stromerzeugung aus Wasserkraft, Windkraft und Sonnenenergie aufgetragen. Deutlich wird die Überlegenheit des Elektroantriebs auch, wenn die Reichweite eines Fahrzeugs auf eine Energieeinheit (kWh) Primärenergie bezogen wird (Abb. 8.1-10).

Der WBGU hält es nicht für sinnvoll, die bestehende ineffiziente Verkehrsinfrastruktur dadurch zu verstetigen, dass die Bioenergienutzung in Form von Biokraftstoffen an diese Struktur angepasst wird. Das Ziel verschiedener Akteure, Bioenergie im Verkehr als Innovationsschub für Technologie und Klimaschutz einzusetzen, sollte an der richtigen Stelle erfolgen. Innovationen sollten vielmehr auf die Elektromobilität gelenkt werden, die es erlaubt, die Effizienz des Antriebssystems von heute ca. 20 % im Verbrennungsmotor unter Einsatz regenerativ erzeugten Stroms auf über 70 % zu steigern. Für den Übergang vom Verbrennungsmotor zum Elektroantrieb spielt die Hybridisierung (kombinierter Verbrennungsmotor- und Elektroantrieb) eine wichtige Rolle. Die Weiterentwicklung von Elektro- und Hybridantrieben mit stärkeren und zuverlässigeren (d.h. langlebi-

Abbildung 8.1-10
Primärenergetische Reichweite von PKW. Durch die wesentlich höheren Wirkungsgrade von Elektromotoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren ergeben sich bei gleichem Primäerenergieeinsatz generell höhere Reichweiten in der Elektromobilität. In den Berechnungen wurden der Verbrauch eines Elektromobils mit 15–22 kWh_{el} und der Verbrauch eines konventionellen Fahrzeuges mit 60–80 $kWh_{Kraftstoff}$ (entsprechend 6–8 l Diesel) je 100 km angesetzt. Die Konversionsgrade von Holz zu Fischer-Tropsch-Diesel (BtL) im Bereich 40–50 % und von Raps zu Biodiesel mit 20–30 %. Die thermochemische Wandlung von Biomasse zu Biomethan und Verstromung wurde für einen Wirkungsgradbereich von 30–60 % berechnet. Die Direkterzeugung von Strom aus Wasser-, Wind- und Solarenergie mit einem Wandlungsgrad von 96–100 % und die Nutzung von Wasserstoffstrom mit einer Bandbreite von 35–42 % einbezogen, die sich aus dem Wandlungsgrad der Direkterzeugung und den Wirkungsgraden der Elektrolyse von 70 % und einer Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle von 50–60 % errechnet. Bioenergie kann folglich im Verkehr viel effizienter über den Weg der Elektromobilität als über den Weg der Biokraftstoffe im Verbrennungsmotor genutzt werden. Die höchsten Reichweiten werden mit direkt erzeugtem regenerativem Strom erzielt. Quelle: WBGU, unter Verwendung von Berechnungen aus Ahmann, 2000; Dreier und Tzscheutschler, 2000; Kaltschmitt und Hartmann, 2003; EAA, 2007; Engel, 2007; Sterner, 2007

geren) Batterien wird auch vom IPCC als Schlüsseltechnologie zur Emissionsminderung im Verkehrsektor genannt (IPCC, 2007c). Der WBGU empfiehlt daher, Biomasse aus Gründen technischer Effizienz und ökologischer Vorteile in Industrieländern über ihre Verstromung für den Betrieb von Elektrofahrzeugen auf Straße und Schiene einzusetzen, und nicht über Biokraftstoffe eine ineffiziente Technologie zu verstetigen.

8.1.2.2 Bioenergie für die Wärmebereitstellung – zentral und dezentral

Häufig wird der Einsatz von Biomasse zur Wärmebereitstellung empfohlen. Dabei kann die Klimaschutzwirkung aus der Substitution der verdrängten konventionellen Brennstoffe abgeleitet werden. Aus energetischer Sicht besitzt Wärme etwa zur Gebäudeheizung einen deutlich geringeren Wert als die gleiche Energiemenge in Form von Strom bzw. mechanischer Energie. Wenn es also gelingt, die erforderliche Wärme in Form von Abwärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung oder mit Hilfe von Wärmepumpen bereitzustellen, lässt sich aus der Biomasse eine höhere exergetische Wertigkeit erzielen als durch reine Verbrennung (Abb. 7.2-3). Die Nutzung von Biomasse in niederen Temperaturbereichen von unter 100°C zur Warmwassererzeugung und zum Heizen ist in Industrieländern als Übergang zu sehen (Holz-, Hackschnitzel- und Pelletheizungen). Wärme wird am effizientesten über KWK und Wärmepumpen bereitgestellt (Kap. 8.1.1). Die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung mit Biomasse ist relativ problematisch. Holzartige und feuchte Biomasse kann nur über den Weg der Vergasung bzw. Vergärung zu Biomethan für den dezentralen Einsatz nutzbar gemacht werden (Kap. 7.2). Der WBGU empfiehlt daher die Abwärme aus KWK-Anlagen zu nutzen, Biomethan in der dezentralen KWK zu verwenden und langfristig mit regenerativem Strom betriebene Wärmepumpen einzusetzen.

8.1.2.3 Bioenergie in der Stromerzeugung – Regelenergie und Kraft-Wärme-Kopplung

Biomasse findet ihren sinnvollsten Platz in der Stromversorgung. Einerseits kann sie wie fossile Energieträger als Regelenergie eingesetzt werden, andererseits erlaubt ihre Verwendung in der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung bzw. in GuD-Kraftwerken den höchsten Brennstoffnutzungsgrad und die höchste THG-Vermeidungsleistung bezogen auf die Menge an eingesetzter Biomasse. Gewisse Pfade wie die Mitverbrennung von Pellets in Kohlekraftwerken oder die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen in Biogasanlagen weisen zudem sehr geringe Vermeidungskosten auf (Kap. 7.2–7.4). In einer allein auf erneuerbaren Energien basierenden Stromversorgung wird Regelenergie zum Ausgleich fluktuierender Stromeinspeiser wie Wind- und Solarstrom benötigt. Zusammen mit massiv ausgebauten elektrischen Netzen mit großen Übertragungskapazitäten und Stromspeichern wie Wasser- oder Druckluftspeichern sowie der Elektromobilität kann Regelenergie aus Biomasse zum Ausgleich der zeitlich variierenden Einspeiseleistung anderer erneuerbarer Energien und der schwankenden Stromnachfrage der Verbraucher dienen. Die spezielle Eigenschaft von Biomasse als Energiespeicher kommt hier zum Tragen. Vor allem Biomethan ist als Energieträger geeignet, weil es sowohl aus einer Vielzahl von Abfall- und Reststoffen als auch aus verschiedensten Energiepflanzen hergestellt werden kann und sich im Gasnetz speichern lässt. Dort entnommen kann es wie Erdgas in vorhandenen Gaskraftwerken, die für Regelenergie konzipiert wurden, eingesetzt werden. Die Verluste, die bei der Konversion von Biomasse zu Biomethan entstehen, werden durch die vielseitige Nutzbarkeit in Verbindung mit dem Erdgasnetz (Speicher, dezentrale KWK usw.) wettgemacht.

Die Kraft-Wärme-Kopplung ist aufgrund der hohen Brennstoffausnutzung energetisch gesehen die optimale Nutzung fossiler und biogener Brennstoffe. Für dezentrale Anwendungen bietet sich die Umwandlung gasförmiger und flüssiger Bioenergieträger in Blockheizkraftwerken (BHKW) an. Neben Biogas können auch Kraftstoffe wie Pflanzenöl, Biodiesel oder Bioethanol in der KWK eingesetzt werden und erzielen dort wegen der Abwärmenutzung und effizienteren Wandlung eine deutlich höhere Klimaschutzwirkung als im Verkehr (s. Kap. 7.3 – Strompfade; Abb. 7.3-6). Feste Bioenergieträger spielen bei der dezentralen KWK noch keine dominante Rolle, weil die Technik (Vergaser, Stirlingmotoren) teilweise noch nicht ausgereift oder unwirtschaftlich ist (FNR, 2007b). Technisch bereits ausgereift und dezentral sinnvoll einsetzbar sind dagegen kleine Heizkraftwerke in Kommunen, die Strom erzeugen und die Abwärme für die Wärmeversorgung öffentlicher Gebäude wie Schwimmbäder oder Schulen verwenden. Sie beziehen die Biomasse lokal etwa in Form von Hackschnitzeln oder Holzpellets. Neben Heizkraftwerken können auch Biogasanlagen so in industrielle Strukturen integriert werden, dass eine Wärmenutzung möglich ist (z. B. Trocknungsanlagen, Gärtnereien, Fertigungsanlagen; FNR, 2006d; Roy, 2008). Zukünftig können auch dezentrale Klein-BHKW effizient in Haushalten verwendet werden.

Für Großkraftwerke ergeben sich für die Bioenergienutzung unterschiedliche Optionen: von der Mitverbrennung in konventionellen Kraftwerken, dem Einsatz in Heizkraftwerken oder Kraftwerken mit integrierter Brennstoffvergasung bis hin zur Bereitstellung von Biogas (Biomethan) sowohl aus Biogasanlagen (Vergärungsprozess) als auch großen Vergasern, die Holz- und Kunststoffabfälle konvertieren. Sowohl bei Anlagen mit Vergärung als auch bei Vergasungsanlagen fällt CO_2 in hoher Konzentration an, das vor der Einspeisung in Erdgasnetze abgetrennt werden muss. Hier lässt sich mit bereits vorhandenen Technologien ein erster Schritt der Dekarbonisierung durchführen, wodurch eine Halbierung der CO_2-Emissionen für diese Konversionsverfahren möglich wird, sofern das abgetrennte CO_2 eingelagert wird. Viele weitere KWK-Technologien zur Nutzung von Biomasse wie z. B. Organic-Rankine-Cycle-Anlagen sind verfügbar und technisch ausgereift. Voraussetzung für die großskalige Abwärmenutzung ist die Nähe zu einem großen Wärmeabnehmer oder der verstärkte Ausbau von Wärmenetzen.

8.1.2.4 Gesamtbewertung von Bioenergie in Industrieländern

Als Fazit für die optimale Einbindung der energetischen Biomassenutzung in zukünftige Energieversorgungssysteme ist festzustellen, dass Biomasse nicht als Kraftstoff für den Betrieb von Fahrzeugen und nur übergangsweise direkt verbrannt für die Wärmeerzeugung eingesetzt werden sollte. In zukünftigen Energiesystemen eignet sich Biomasse vielmehr zur Stromerzeugung entweder in KWK-Anlagen wie Heizkraftwerken und kleinen BHKW, zur Mitfeuerung in Kohlekraftwerken oder in Gas- und Dampfkraftwerken mit höchster Effizienz. Die konsequente Umsetzung der vorgestellten Systeme und die Verwendung elektrischer Energie im Verkehrssektor führen zu einem Effizienzgewinn um mehr als den Faktor zwei. Abfälle aus der Bioenergienutzung wie Asche oder Gärreste können zudem als mineralischer Dünger wieder dem Kreislauf zugeführt wer-

Abbildung 8.1-11
Zukünftige, nachhaltige Energieversorgungsstrukturen in Industrieländern. Aufbauend auf einem verbundenen Gas- und Stromnetz und der Abtrennung und Speicherung von CO_2 aus der Nutzung fossiler und biogener Brennstoffe erfolgt die Energieversorgung zu großen Teilen elektrisch. Die Nutzwärme wird durch Kraft-Wärme-Kopplung und den Einsatz von Wärmepumpen bereitgestellt.
Quelle: WBGU

Abbildung 8.1-12
Erste Stufe der nachhaltigen Bioenergienutzung in Industrieländern. Biomasse wird primär dort eingesetzt, wo sie ohne große Konversionsverluste und zu geringen Kosten direkt fossile Energieträger mit hohen Emissionswerten ersetzen kann, also vorrangig zur Verdrängung von Kohle durch Mitfeuerung in Kohlekraftwerken. Im Wärmebereich werden Erdgas und Erdöl freigesetzt, die übergangsweise etwa im Verkehr verwendet werden können.
Quelle: WBGU

Abbildung 8.1-13
Zweite Stufe der nachhaltigen Bioenergienutzung in Industrieländern. In einer zukünftigen nachhaltigen und integrierten Energieversorgung ersetzen Direkterzeugung und Bioenergie die fossilen Energieträger in der Stromerzeugung. Unter Nutzung der Abwärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung und der Umgebungswärme kann über regenerativen Strom die Wärmeversorgung sichergestellt werden. Elektromobilität setzt Erdöl frei, das stofflich genutzt werden kann. Bei der Produktion von Biomethan ist die Abtrennung von CO_2 notwendig und dessen Speicherung möglich.
Quelle: WBGU

den. Dies ist ein wichtiges Kriterium der Nachhaltigkeit der Bioenergienutzung.

Biomasse, vor allem Reststoffe, können demnach optimal über den Pfad der Vergärung (Biogas) und der Vergasung (Rohgas) eingesetzt werden (Abb. 8.1-11). Vergasungsprozesse mit der Möglichkeit, nahezu alle Formen von Biomasse zu konvertieren, befinden sich noch im Entwicklungsstadium, versprechen aber für die Zukunft ein breites Anwendungsspektrum. Bei den technisch schon heute etablierten ebenfalls sehr flexiblen Vergärungsprozessen ist Biomethan ohnehin das Hauptprodukt. Diese beiden Pfade ermöglichen die Herstellung von Biomethan, welches als synthetisches Erdgas in die vorhandenen Erdgasnetze sowohl dezentral eingespeist als auch wiederum dezentral zur Strom- und Wärmebereitstellung gewandelt werden kann. Zu jeder Zeit muss dabei der klimaschädliche Methanschlupf soweit wie möglich begrenzt werden. Für Regionen mit gut ausgebauten Erdgasnetzen eröffnet sich so für Biomethan eine universelle Nutzung vor allem in der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung mit kleiner Leistung bei hohem Brennstoffnutzungsgrad. Im Vergleich zu anderen Bioenergienutzungsformen erzielt die Herstellung und Nutzung von Biomethan eine deutlich höhere Klimaschutzwirkung (Größenordnung 20 %; Tabelle 7.3-2), wenn das beim Konversionsprozess ohnehin abzutrennende CO_2 nicht in die Atmosphäre entlassen, sondern in einer gesicherten Deponie gespeichert wird. Der WBGU hat an anderer Stelle zu den Risiken und Anforderungen einer nachhaltigen CO_2-Speicherung Stellung genommen (WBGU, 2006). Zudem können Reststoffe wie Waldrestholz heute nicht in der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung in Haushalten verwendet werden. Viele Reststoffe können nur über den Biomethanpfad einer effizienteren Verwendung mit hoher Klimaschutzwirkung zugeführt werden.

Abb. 8.1-11 fasst die Elemente nach der Transformation der Energiesysteme und die spezifische Rolle der Bioenergie zusammen. Besonders attraktiv erscheint dabei, dass die beiden klassischen Energieträger Erdgas und Kohle in dieses zukünftige System integrierbar sind. Besonders die Kohlenutzung über den Pfad der Vergasung mit anschließender Konversion des Synthesegases in synthetisches Methan eröffnet durch die dabei ohnehin erforderliche Abtrennung von CO_2 eine wesentlich klimaschonendere Nutzung als dies bei Verwendung von Kohle in herkömmlichen Kohlekraftwerken möglich ist. Die Emissionswerte der Kohlenutzung liegen durch die Abtrennung und Speicherung bei Werten der Erdgasnutzung. Die Technik zur Kohlevergasung ist heute noch eine Nischentechnologie, die in einigen Anlagen in den USA erfolgreich im Einsatz ist (IPCC, 2005). Ebenso wie die CCS-Technologie muss sie weiterentwickelt und verbessert werden, um im großen Maßstab Verwendung zu finden.

8.1.2.5 Stufen der nachhaltigen Bioenergienutzung in Industrieländern

Als wichtigstes Ziel der Nutzung von Bioenergie in Industrieländern sieht der WBGU den Klimaschutz. Daraus ergibt sich, dass Reststoff- und Kaskadennutzung erste Priorität haben, weil diese Landnutzungsänderungen vermeiden, die Emissionen beim Anbau von Energiepflanzen verursachen können. Energiepflanzen sollten aus WBGU-Sicht nur zum Einsatz kommen, wenn ihre Klimaschutzwirkung einschließlich der Emissionen aus Landnutzungsänderungen als besonders positiv nachgewiesen ist und die Nachhaltigkeitskriterien des Mindeststandards (Kap. 10.3) eingehalten werden. Die Verwendung oder Einfuhr von Biomasse aus dem Anbau von Energiepflanzen, die diesen Kriterien nicht genügt, sollte nicht gestattet werden.

Zunächst erscheinen diejenigen Anwendungsbereiche am attraktivsten, bei denen Energieträger mit hohen CO_2-Emissionen verdrängt werden, vor allem Stein- und Braunkohle, aber auch Erdöl. Dies ist z. B. bei der Mitverbrennung von Holz in Kohlekraftwerken oder der Nutzung von Holz zur Gebäudeheizung der Fall. Während die Holznutzung in Kraftwerken zu einer entsprechenden Verringerung des Kohlebedarfs führt, setzt die Verwendung von Holz bei der Heizung und Prozesswärmebereitstellung entsprechende Mengen an Öl und Gas frei, die sich übergangsweise im Verkehrssektor einsetzen lassen. Im Wärmebereich lässt sich aufgrund des Wandlungsgrads mehr Erdöl ersetzen als in der Mobilität (Abb. 8.1-12). Ein Beispiel ist Holz, das durch direkte Verbrennung in einer Heizung Erdöl ersetzt. Wird dieselbe Menge Holz zu Fischer-Tropsch-Diesel (BTL) konvertiert, kann sie nur halb so viel Erdöl ersetzen, weil die andere Hälfte der Energie für den Konversionsprozess benötigt wird.

Mit zunehmender Effizienz der globalen Energiesysteme, bei denen zusätzlich zur verbesserten Wärmedämmung die Gebäudeheizung und Prozesswärmebereitstellung über Kraft-Wärme-Kopplung bzw. Wärmepumpen erfolgt und auch die Elektromobilität im Verkehrsbereich eingeführt ist, verringert sich der Bedarf an Direktverbrennung und Kraftstoffen. Gleichzeitig nimmt die Nachfrage nach elektrischer Energie zu. In dieser Situation, die sich in einigen Dekaden einstellen könnte, wird ein Großteil der elektrischen Energie mit Hilfe von Direkterzeugung aus Wasserkraft, Solar- und Windenergie bereitgestellt, deren Leistung allerdings starken zeitlichen

Schwankungen unterliegt. Die biogenen und fossilen Energieträger bekommen dann zunehmend die Aufgabe, diese Leistungsschwankungen auszugleichen. Der Ausgleich kann entweder über dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung oder über schnell regelbare Gas- und Dampfkraftwerke erfolgen. Beide Kraftwerkstypen werden heute hauptsächlich mit Erdgas (d.h. Methan) betrieben. Damit bietet sich die Nutzung von biogenem Methan (Biomethan) an, das in der schon heute vorhandenen Infrastruktur der Erdgasnetze verwendet werden kann. Die Biomassenutzung erfolgt demnach im Idealfall in zwei Stufen: Zunächst wird Biomasse in Kohlekraftwerken mit verbrannt oder in Heizungsanlagen eingesetzt (Abb. 8.1-12). Später wird das durch Vergärung und Vergasung erzeugte Biomethan zunehmend in Erdgasnetze eingespeist und in der Kraft-Wärme-Kopplung zur Strom- und Wärmebereitstellung genutzt. Der so erzeugte Strom wird auch in der Elektromobilität und in Wärmepumpen verwendet (Kap. 8.1.1; Abb. 8.1-13). Durch die Elektromobilität wird wiederum Erdöl für die stoffliche Nutzung zur Herstellung von Kunststoffen, Pharmazeutika und anderen kohlenstoffbasierten Stoffen freigesetzt.

8.2 Bioenergie als Teil einer nachhaltigen Energieversorgung in Entwicklungsländern

Ähnlich wie in Industrieländern wird die Biomassenutzung auch in Entwicklungsländern eine ergänzende Rolle im Zusammenspiel mit anderen Formen erneuerbarer Energien spielen. Für die elektrische Energieerzeugung in ländlichen Gebieten werden zunehmend Photovoltaik-Anlagen, kleine Windkraftanlagen und Kleinwasserkraftanlagen eingesetzt, die in Verbindung mit Biokraftstoffgeneratoren eine gesicherte Versorgung leisten. Der Ersatz klassischer Dieselgeneratoren durch biogen betriebene Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen erlaubt die Verwendung lokal erzeugter Biokraftstoffe bei gleichzeitiger Bereitstellung von Nutzwärme. In Kapitel 8.2 wird explizit auf die Rolle der Biomasse in Entwicklungsländern eingegangen und andere Energiequellen zur Überwindung der Energiearmut werden nicht weiter betrachtet. Biomasse ist der Brennstoff, der in den meisten ländlichen Regionen als Hauptenergiequelle derzeit genutzt wird und dessen technische Handhabung und Anwendung gewährleistet ist. Im Gegensatz dazu zeigt die Erfahrung, dass neue Technologien wie Photovoltaik nur langsam angenommen und genutzt werden, da die Anlagen von den Nutzern selbst oft nicht gewartet werden können. Technologien, die auf den vertrauten Brennstoff Feuerholz zurückgreifen, können deshalb in der realen Anwendung leichter Fuß fassen.

8.2.1 Energierevolution in der traditionellen Biomassenutzung

Der Großteil der traditionellen Biomasse wird in ländlichen Gebieten der Entwicklungsländer genutzt, die von Armut und einem niedrigen technischen Entwicklungsstand geprägt sind. Neue, effizientere Technologien zur Nutzung von Bioenergie müssen daher einfach handhabbar in Installation, Gebrauch und Wartung sein und für die Bevölkerung bezahlbar bleiben. Eine moderne Bioenergienutzung bietet unter diesen Voraussetzungen die Chance, Beschäftigung im ländlichen Raum zu schaffen, den Grad der flächendeckenden Energieversorgung zu erhöhen, die Importabhängigkeit zu mindern und durch effizientere Technologien die Entwaldung und den energetisch bedingten Treibhausgasausstoß zu verringern. Durch den Ersatz von traditionellen Herden durch effiziente Holzherde kann der Treibhausgasausstoß bei gleichem Nutzen um ca. 60 % reduziert werden und beim Ersatz durch Kleinstbiogasanlagen sogar um 95 %. Einerseits gelingen diese Reduktionen durch eine effizientere Verbrennung, die weniger Methan und Lachgas verursacht und andererseits durch eine vermiedene Entwaldung (Kap. 7.3). Um für eine Verbreitung moderner Bioenergienutzung und für einen Rückgang der traditionellen Nutzung zu sorgen, müssen parallel zwei Strategien verfolgt werden: Zum einen müssen effiziente, kostengünstige Technologien bereitgestellt werden und zum anderen müssen die teilweise erheblichen soziokulturellen Hemmnisse beim Einsatz dieser Technologien überwunden werden.

8.2.2 Energieversorgung in ländlichen Gebieten durch Biomassenutzung

Verbesserte Holzherde

Verbesserte Holzherde bieten eine einfache und kostengünstige Möglichkeit, den Feuerholzverbrauch drastisch zu verringern. Die direkte Verwendung von Holz in verbesserten Holzherden ist effizienter als die Verkohlung zu Holzkohle und anschließende Verbrennung in Holzkohleherden (Kap. 7.2). Das Design verbesserter Holzherde kann von ganz einfachen, fast kostenlosen Lehmherden bis zur Metallbauweise reichen, und sie sind so allen Bevölkerungsschichten prinzipiell, d.h. abgesehen von soziokulturellen Hemmnissen (Kap. 10.8), zugänglich. Die

Kasten 8.2-1

Gesundheitliche und ökologische Auswirkungen der traditionellen Biomassenutzung

Die moderne Nutzung von Bioenergie verfügt über ein großes Potenzial, um ineffiziente traditionelle Biomassenutzung zurückzudrängen, die mit negativen gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen verbunden ist. Auf diese Weise können die Lebensbedingungen für private Haushalte und Kleinstbetriebe vor allem im ländlichen Raum in Entwicklungsländern erheblich verbessert werden (WBGU, 2003a). Nach wie vor wird in vielen Entwicklungsländern überwiegend traditionelle Biomasse auf ineffiziente Weise zum Kochen und Heizen verwendet. Ca. 2,5 Mrd. Menschen (52 % der Bevölkerung in den Entwicklungsländern) sind auf Biomasse als primäre Energiequelle angewiesen und verfügen nicht über effiziente Technologien. Es werden Feuerholz, Holzkohle, Agrarabfälle und Tierdung zur Wärmebereitstellung verbrannt. In vielen Ländern Afrikas oder Asiens werden durch diese Energieträger bis zu 95 % der Energienachfrage der Haushalte gedeckt (Tab. 8.2-1; IEA, 2006b).

Die Internationale Energieagentur (IEA) prognostiziert, dass ohne gezielte Maßnahmen die Anzahl der Menschen, die auf traditionelle Biomassenutzung sowie auf ineffiziente Nutzungsformen angewiesen sind, bis 2015 auf 2,6 Mrd. und bis 2030 auf 2,7 Mrd. Menschen anwachsen wird (IEA, 2006b). Die Brennstoffe werden dabei üblicherweise höchst ineffizient auf 3-Steine-Herden oder anderen einfachsten Herden unter schlechten stöchiometrischen Bedingungen verbrannt, was zu starker Innenraumverschmutzung durch Rußpartikel und andere Schadstoffen sowie zur Bildung des giftigen Kohlenmonoxids führt. Die hierdurch hervorgerufenen Gesundheitsschäden sind beträchtlich. Jedes Jahr sterben über 1,5 Mio. Menschen an der Schadstoffbelastung in Innenräumen, zwei Drittel davon in Südostasien und Afrika südlich der Sahara (WHO, 2006). Davon haben mehr als 1,3 Mio. Todesfälle ihre Ursache in der Verwendung von Biomasse, der Rest in der Kohlenutzung (IEA, 2006b). Damit fordert die traditionelle Biomassenutzung jährlich mehr Tote als Malaria (ca. 1,2 Mio. pro Jahr).

Hinzu kommt, dass für die Brennstoffbeschaffung häufig lange Wege zurückgelegt werden müssen. Dies trifft in der Regel Mädchen und Frauen, die dabei oft Gefahren ausgesetzt sind und viel Zeit aufwenden müssen, die dann für Bildung oder erwerbswirtschaftliche Tätigkeiten nicht mehr verfügbar ist. Außerdem trägt diese Art der Biomassenutzung durch die zunehmende Abholzung der Wälder und die Zerstörung der Steppen zur Degradation natürlicher Ökosysteme und zum Klimawandel bei und mindert langfristig die Entwicklungschancen dieser Regionen (WBGU, 2003a).

Tabelle 8.2-1
Menschen, die auf Biomasse als primäre Energiequelle zum Kochen angewiesen sind.
Quelle: IEA, 2006b

	Gesamtbevökerung		Land		Stadt	
	[%]	Mio.	[%]	Mio.	[%]	Mio.
Südliches Afrika	76	575	93	413	58	162
Nordafrika	3	4	6	4	0,2	0,2
Indien	69	740	87	663	25	77
China	37	480	55	428	10	52
Indonesien	72	156	95	110	45	46
Rest von Asien	65	489	93	455	35	92
Brasilien	13	23	53	16	5	8
Rest von Lateinamerika	23	60	62	59	9	25
Summe	**52**	**2.528**	**83**	**2.147**	**23**	**461**

dadurch mögliche Reduktion des Holzverbrauchs auf die Hälfte oder ein Viertel – je nach Herdbauweise – ist eine einfache und kostengünstige Möglichkeit, Bioenergie effizienter und somit umweltfreundlicher zu nutzen (Kap. 7.2 und 9.2.2; Kasten 8.2-2; Kumar et al., 1990).

Klein-Biogasanlagen

Kleine Biogasanlagen können ebenfalls den Feuerholzverbrauch reduzieren. Die zusätzlichen Vorteile von Biogasanlagen gegenüber verbesserten Holzherden sind verbesserte Innenraumluft, eine stärkere Reduktion der Treibhausgasemissionen (Kap. 7.3; Kästen 7.3-3 und 8.2-1) und verbesserter Dünger für die Landwirtschaft. Studien aus Nepal zeigen, dass Frauen bis zu 3 Stunden ihrer täglichen Arbeitszeit einsparen können, wenn sie mit Biogas kochen, da keine Zeit für das Sammeln des Brennstoffes anfällt und das Kochen selbst einfacher ist (ter Heegde, 2005). Die verbesserte Luftqualität senkt im Übrigen die Ausgaben für Medikamente und steigert die Lebenserwartung. Biogas kann auch zur Beleuchtung verwendet werden. Diese Technologie erzielt zwar nicht den höchsten Wirkungsgrad, ist aber ein guter Kompromiss zwischen einfacher Handhabung, Installation und Wartung, dem energetischen Nutzen

Kasten 8.2-2

Länderstudie Uganda – Überwindung traditioneller Bioenergienutzung durch aktive Bioenergiepolitik

Uganda ist ein kleiner, relativ dicht besiedelter Binnenstaat in Ostafrika, der mit einem stark von traditioneller Biomassenutzung geprägten Energiesystem repräsentativ für Subsahara-Afrika ist. 93 % des Primärenergiebedarfs werden durch traditionelle Biomassenutzung gedeckt. Feuerholz leistet dabei mit 82,4 % den größten Beitrag im Energiehaushalt, gefolgt von Holzkohle mit 5,8 % und biogenen Reststoffen (vorwiegend Zuckerrohrbagasse) mit 5,0 %. Fast 80 % der genutzten Biomasse wird im Haushalt zum Kochen und der Wassererwärmung eingesetzt. Biomasse ist und bleibt auf absehbare Zeit der wichtigste Energieträger in Uganda (Turyareeba und Drichi, 2001).

In ländlichen Gebieten, wo fast 85 % der Bevölkerung leben, wird fast ausschließlich der 3-Steine Herd eingesetzt. In größeren Siedlungen und Städten kommen aber auch Holzkohleherde aus Metall, die zumindest doppelt so effizient sind wie die 3-Steine-Herde (Pesambili et al., 2003). In weiten Teilen des Landes existieren keine Energieversorgungsstrukturen wie beispielsweise ein Stromnetz (World Bank, 2008f). In der Industrie werden geringe Mengen landwirtschaftlicher Reststoffe wie Bagasse und Feuerholz zur Deckung des Eigenbedarfs an Strom und Wärme eingesetzt. Strom wird in Uganda hauptsächlich aus Wasserkraft gewonnen, überschüssige Kapazitäten aber auch z.B. nach Westkenia exportiert. Biostrom wird hingegen fast ausschließlich national in KWK-Anlagen hergestellt. Eine Ausnahme stellen die Zuckerrohrfabriken dar, die überschüssigen Strom in die Netze einspeisen.

Die Anteile erdölbasierter Kraftstoffe wie Diesel, Benzin und Kerosin am nationalen Energiehaushalt sind mit 6,0 % und für die Stromerzeugung mit 0,8 % sehr gering. Fossile Kraftstoffe werden zu 100 % importiert, da es bislang keine Erdölraffinerie in Uganda gibt (MEMD, 2004). Die Regierung hat kürzlich das Programm „Oil and Gas Policy“ verabschiedet, das die Erschließung der Erdölressourcen des Landes regelt. Ab 2009 ist eine Förderung von 4.000 Barrel pro Tag geplant, die zu gut einem Drittel den nationalen Bedarf decken kann. Neben der Versorgung des Verkehrs sollen die gewonnenen Mineralölprodukte auch zur Stromproduktion eingesetzt werden (Olaki, 2008).

Für die Regierung Ugandas ist der Zugang zu nachhaltigen modernen Energiedienstleistungen Teil ihrer Armutsbekämpfungsstrategie. Dazu wurden zwei Strategiepapiere vorgelegt, “Uganda Energy Policy” (2002) und “Renewable Energy Policy” (MEMD, 2007). Das Hauptziel der „Uganda Energy Policy“ ist es, den für eine soziale und ökonomische Entwicklung notwendigen Energiebedarf auf eine umweltfreundliche Weise zu decken (MEMD, 2002). Eine Zielsetzung der „Renewable Energy Policy” ist es, durch Entwicklungsstrategien für erneuerbare Energien vor allem die sozio-ökonomische Situation von Frauen und Armen zu verbessern (MEMD, 2007). Wie in anderen Entwicklungsländern auch, wird in Uganda den Zielen der Entwicklung, der Versorgungssicherheit und –unabhängigkeit grundsätzlich mehr Bedeutung beigemessen als dem Klimaschutz. Biomasse ist außer zur Versorgung ländlicher Haushalte vor allem für den Kraftstoffsektor interessant, weil Strom aus anderen Energieträgern erzeugt werden kann und Wärme mehr oder weniger nur zum Kochen gebraucht wird. Nachdem zukünftig ein Drittel des Kraftstoffbedarfs durch eigene Erdölquellen gedeckt werden kann, steht ein Biokraftstoffprogramm nicht im Vordergrund der staatlichen Planungen.

Die Regierung hat in den letzten Jahren Anstrengungen in Richtung Energieeffizienz unternommen und ein Programm zur Einführung verbesserter Holzherde umgesetzt. Das „Energy Advisory Project (EAP)“ des ugandischen Ministeriums für Energie und Mineralien zielt auf die Ablösung des 3-Steine-Herds durch verbesserte Holzherde. Dabei ist die Verbreitung verbesserter Holzherde mit der Aus- und Weiterbildung von Handwerkern und der Schulung von Anwendern verbunden. Zu Beginn des Jahrtausends waren ca. 125.000 Haushalte mit verbesserter Technologie ausgestattet, was 2,7 % aller Haushalte entsprach (Turyareeba und Drichi, 2001). Dieser Anteil konnte bis heute im Rahmen des EAP, das von der GTZ unterstützt wird, trotz stetig steigenden Einwohnerzahlen auf 357.500 Haushalte bzw. 8 % gesteigert werden (GTZ-EAP, 2007). Uganda hat sich 2007 das Ziel gesetzt, die Anzahl der verbesserten Herde bis 2017 auf 4 Mio. zu erhöhen (REN21, 2008).

Die EU-Energieinitiative für Armutsbekämpfung und nachhaltige Entwicklung (EUEI) und die GTZ bewerten die Anstrengungen Ugandas im Bereich Bioenergie sehr positiv: Es wurde eine kohärente und sektorübergreifende Biomassestrategie entwickelt und bei der Umsetzung erhebliche Fortschritte erzielt (Teplitz-Sembitzky, 2006). Ob das potenzielle Interesse an der Produktion von Biokraftstoffen von der ugandischen Regierung nachhaltig kanalisiert werden kann, bleibt aufgrund der Governanceprobleme im Bereich Naturschutz fraglich (Biryetega, 2006; NFA, 2006; ABN, 2007).

und der Kosten der Energiedienstleistung. In Nepal und Vietnam sind bereits über 200.000 Klein-Biogasanlagen im Einsatz. In Indien wurden seit 1980 über 4 Mio. Anlagen installiert, wovon noch über 70 % in Gebrauch sind. In Nepal konnten Haushalte im Schnitt jährlich 5 t Treibhausgasemissionen (CO_2eq) vermeiden, indem sie Biogasanlagen anstelle nicht nachhaltiger, traditioneller Biomasse einsetzten (ter Heegde, 2005). Diese Vermeidung resultiert aus den vermiedenen Methanemissionen von Dung, der für die Anlage verwendet wird sowie durch den Ersatz von Dünger und nicht-nachhaltig geerntetem Feuerholz. Diese Lösung ist besonders für Haushalte, Schulen und auch öffentliche Einrichtungen geeignet und reduziert die Abhängigkeit der Bevölkerung von Feuerholz.

Biomassevergasung

Biomassevergaser können Reststoffe und Abfälle wie Altholz, Kokosnussschalen, Kaffee- und Reisspreu in Rohgas verwandeln. Das Rohgas kann beispielsweise direkt zur Prozesswärmeerzeugung in Trocknungsanlagen oder Bäckereien eingesetzt werden oder in Motoren verstromt werden. Solche Holzvergaser

können Generatoren in ländlichen Gebieten antreiben und die ländliche Elektrifizierung voranbringen. Laut TERI (2008) sind sie ökonomisch effizient, umweltfreundlich und gut geeignet für ländliche Gemeinschaften, weil lokale Abfälle verwertet und die Technologie selbständig gewartet werden kann. Für Haushalte stehen auch kleine Vergaser zur Verfügung. Werden Reststoffe auf diese Weise genutzt, entsteht weniger Ruß und die Innenluftverschmutzung wird reduziert. Besonders erfolgreiche und beispielhafte Programme werden in Indien durchgeführt, wo bis zu 1 Mio. Kleinst- und Kleinunternehmen von dieser Technologie profitieren (Mande und Kishore, 2007).

Biomasseverbrennung

In vielen Industriezweigen der Entwicklungsländer fallen große Mengen Reststoffe an. Rückstände und Abfälle wie Zuckerrohr-Bagasse aus der Zuckerherstellung oder Altholz können direkt in der Kraft-Wärme-Kopplung zur Stromerzeugung und Trocknungswärmebereitstellung genutzt werden. Weitere Industriezweige mit biogenen Reststoffen sind Brennereien, Textil- und Papierfabriken oder Betriebe zur Nahrungsmittelherstellung. Kleine KWK-Anlagen können Abfälle wie Maiskolben, Erdnussschalen, Reis- und Kaffeespreu oder Sägemehl zu Strom und Wärme wandeln. In Indien und anderen Ländern gibt es derartige Anlagen etwa in Zuckerfabriken, die durch geschickte Integration den Eigenstrombedarf decken (MEMD, 2007). Wird die Effizienz dieser Anlagen gesteigert und ein kleines elektrisches Netz aufgebaut, könnten auch die umliegenden Haushalte mit Strom versorgt werden.

Pflanzenöl zur lokalen Bereitstellung von elektrischer Energie und mechanischen Antrieben

In weiten Teilen der Entwicklungsländer kommen Dieselgeneratoren zum Einsatz. Diese Generatoren können mit geringem technischen Aufwand für die Verwendung von Pflanzenöl umgerüstet werden, welches vor Ort hergestellt wird. Ölpflanzen wie *Jatropha* können dazu auf marginalen Flächen angebaut und die Früchte manuell gepresst werden. Ein solcher Nutzungspfad ist einfach anzuwenden, weil mechanische Pressen oder ein Motor leichter zu reparieren sind als eine Photovoltaik-Anlage oder ein Holzvergaser. Die umgerüsteten Pflanzenölmotoren können dann mechanische Energie für Wasserpumpen oder Getreidemühlen liefern oder an einen Stromgenerator angeschlossen werden. In dörflichen Ladestationen können so tragbare Batterien aufgeladen werden, mit deren Hilfe Häuser und Hütten beleuchtet oder Kleingeräte wie Mobiltelefone oder Radiogeräte dezentral betrieben werden können.

8.2.3 Die Rolle der Bioenergie in einer nachhaltigen und integrierten Energieversorgung in Entwicklungsländern

8.2.3.1 Bioenergie im Verkehr

Viele Entwicklungsländer sind in hohem Maß von Erdölimporten abhängig. Sie hoffen nun, diese Abhängigkeit durch Biokraftstoffe zu verringern und eine zusätzliche Einkommensquelle im ländlichen Raum zu schaffen (Kasten 8.2-3). Biokraftstoffe der ersten Generation wie Bioethanol oder Biodiesel können problemlos in Entwicklungsländern hergestellt werden. Die Kultivierung von beispielsweise Ölpalme oder Zuckerrohr sind Stand der Technik und eine attraktive Option zur Eigenversorgung mit Kraftstoffen. Kraftfahrzeuge können auf den Betrieb mit Pflanzenöl umgerüstet werden bzw. wie in Brasilien als sog. flexible fuel vehicles gebaut und sowohl mit Bioethanol als auch mit Mineralbenzin betrieben werden.

Mit Hilfe von Ölpflanzen wie *Jatropha* und *Pongamia,* die auf marginalen, nicht auf für den Nahrungsmittelanbau geeigneten Flächen angebaut werden können, kann dabei das Problem der Nutzungskonkurrenz zwischen Energiepflanzen und Nahrungsmittelproduktion weitgehend vermieden werden. Die Nutzung von degradierten Flächen eignet sich in Entwicklungsländern zur Herstellung von Biokraftstoffen übergangsweise so lange, bis sich die Elektromobilität etabliert hat und damit flüssige Kraftstoffe nicht mehr benötigt werden. Eine erste Stufe in der Einführung der Elektromobilität sind elektrisch betriebene Zweiräder. Einige Millionen Elektrofahrräder sind bereits heute in China im Einsatz. Auch ein Ausbau des öffentlichen Nah- und Fernverkehrs in Schwellenländern unter verstärkter Nutzung elektrisch betriebener Schienenfahrzeuge, die mit Biostrom betrieben werden, wäre ein Schritt in die richtige Richtung, denn er senkt die Notwendigkeit flüssiger Kraftstoffe. Biokraftstoffe können allgemein effizienter im Stromsektor verwendet werden. So kann beispielsweise Bioethanol in Gas- und Dampfkraftwerken in der Turbine verbrannt oder Biodiesel respektive Pflanzenöl in BHKW eingesetzt werden. Die Entscheidung über den Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehr oder im Stromsektor sollte sich nach dem Anteil fossiler Energien in der Stromerzeugung richten. Bei einem hohen Anteil von fossilem Strom im Strommix wie beispielsweise China können Biokraftstoffe die größte Klimaschutzwirkung über den Weg der Verstromung erreichen (Kap. 7.3 und 9.2). In Ländern wie beispielsweise Uganda,

Kasten 8.2-3

Entwicklungschancen der Bioenergieproduktion für den überregionalen Binnenmarkt und den Export

Inwieweit eine großflächige Versorgung mit biogenen Energieträgern im eigenen Land volkswirtschaftlich vielversprechend und nachhaltig sein kann, wird kontrovers diskutiert (Peskett et al., 2007). Für eine gesamtwirtschaftlich bedeutende Umstellung auf moderne Bioenergie sprechen die Diversifizierung von Energiequellen und -technologien und eine geringere Abhängigkeit von den Preisschwankungen auf dem internationalen Ölmarkt. Das ist besonders für ölimportierende Entwicklungsländer von Bedeutung (Kojima und Johnson, 2005). Viele Schwellen- und Entwicklungsländer haben sich daher Ziele für die Produktion und den Einsatz von Bioenergie gesetzt oder planen dies. Beispiele sind China, Indien, Südafrika und zahlreiche Entwicklungsländer in Südostasien, West- und Ostafrika sowie Südamerika (Kap. 4.1 – Aktuelle Bioenergieförderpolitik). Brasilien hat es durch den Ausbau der Bioethanolproduktion geschafft, von Ölimporten weitestgehend unabhängig zu werden (Luhnow und Samor, 2006).

Auch durch den Export biogener Energieträger versprechen sich viele Länder Entwicklungschancen (UNCTAD, 2006b). Häufig haben Entwicklungsländer im Vergleich zu Industrieländern komparative Kostenvorteile bei der Produktion von Agrargütern und folglich auch von Energiepflanzen. Der Export schafft Deviseneinnahmen, erzeugt Einkommen und generiert mittel- oder unmittelbare Staatseinnahmen. Auf diesen Wegen wird das Wirtschaftswachstum gefördert. Voraussetzung für den erfolgreichen Export biogener Energieträger ist, dass der Zugang zu den Märkten potenzieller Importländer gegeben ist, d. h. dass diese weder erhebliche Importbeschränkungen vorsehen, noch dass diese die komparativen Kostennachteile ihrer Produzenten durch (Agrar-)Subventionen staatlich ausgleichen oder gar umzukehren versuchen (Worldwatch Institute, 2006). Würden solche Subventionen in den Industrieländern gestrichen und stiege die Nachfrage nach Biokraftstoffen der 1. Generation, ist allgemein mit einem Steigen der Agrarpreise zu rechnen. Dadurch steigen national und international die Produktionsanreize für Landwirte in den Entwicklungsländern und ihre Einkommen (Kap. 5.2.5.2 – Einfluss des Bioenergiebooms auf Preise und Einkommen); beides wäre ein für Entwicklungsländer günstiger Effekt.)

Es zeigt sich jedoch bisher, dass Biokraftstoffe auch in Entwicklungsländern selten wettbewerbsfähig sind. Bei den meisten Biokraftstoffprogrammen sind hohe Subventionen notwendig (Kap. 4.1). Bislang hat sich nur in Brasilien eine marktreife Ethanolindustrie entwickelt, und dazu bedurfte es 20 Jahre staatlicher Unterstützung (Kojima und Johnson, 2005). Es ist grundsätzlich fraglich, ob der Einsatz öffentlicher Mittel für die großskalige Bioenergieerzeugung volkswirtschaftlich gerechtfertigt ist oder ob die Haushaltsmittel nicht besser für andere Zwecke wie beispielsweise Bildung, Gesundheit, Armutsbekämpfung oder den Ausbau von Infrastruktur zur Verfügung gestellt werden sollten. Hinzu kommt, dass bisher die Nutznießer der durch Steuergelder subventionierten Produktion von Biokraftstoffen meistens große landwirtschaftliche Betriebe sind und die Armut der ländlichen Bevölkerung dadurch kaum gelindert wird. Geht man allerdings davon aus, dass die technologische Entwicklung voranschreitet, der Ölpreis weiter hoch bleibt oder gar steigt, die Beimischquoten aufrechterhalten und vermehrt implementiert werden, dann wird die Produktion von Biokraftstoffen auf Basis auch anderer Ausgangsstoffe als Zuckerrohr in weiteren Ländern mit hoher Wahrscheinlichkeit betriebswirtschaftlich rentabel (de La Torre Ugarte, 2006).

Weil Landwirtschaft in Entwicklungsländern heute noch sehr arbeitsintensiv ist, schaffen die Produktion von pflanzlichen Rohstoffen, ihr Transport und die Weiterverarbeitung Arbeitsplätze, wenn auch teils nur saisonal, und generieren Einkommen (Kojima und Johnson, 2005). Von der zur Produktion, Transport und Weiterverarbeitung erforderlichen Infrastruktur sind weitere positive Entwicklungseffekte zu erwarten. Um positive Entwicklungseffekte für den ländlichen Raum zu realisieren, wird u. a. von NRO häufig argumentiert, dass vor allem die kleinskalige bzw. kooperative Produktion gefördert werden muss, um die Nachteile der großskaligen Produktion von cash crops zu vermeiden.

Es zeigt sich allerdings, dass der pauschale Vorwurf, dass die großskalige Cash-crop-Produktion unausweichlich zu sehr schlechten Arbeitsbedingungen und zur Ausbeutung von Arbeitskräften führt, nicht haltbar ist. In der brasilianischen Provinz Sao Paulo erhielten Zuckerrohrschneider z. B. bereits in den frühen 1990er Jahren etwa 140 US-$ Lohn pro Monat. Ihre Löhne lagen damit höher als die von 86 % aller Arbeiter in der Landwirtschaft und höher als die von 46 % aller Industriearbeiter (UNCTAD, 2006b).

Aufgrund der Vorteile der Massenproduktion sowohl beim Anbau von Agrargütern als auch gerdade bei der Weiterverarbeitung ist anzunehmen, dass sowohl inländische als auch ausländische Investitionen eher in großskalige Projekte fließen. Daher werden weitere Konzentrationsprozesse in der Agrarwirtschaft und der Landverteilung zugunsten einheimischer Eliten und (transnationaler) Großunternehmen sowie nicht nachhaltige Monokulturen befürchtet (ABN, 2007; Biofuelwatch, 2007). Diese Konzentration scheint besonders korruptionsanfällig und kann mit der Ausbeutung von Kleinbauern als Vertragsproduzenten, ihrer Vertreibung bei ungesicherten Landrechten, Gewalt, steigenden Landpreisen und Umweltschäden durch großflächige Rodungen einhergehen (Kojima und Johnson, 2005; Misereor, 2007). Um die Teilhabe von Kleinbauern und Kleinstbetrieben am Bioenergieboom zu sichern, können beispielsweise Kooperativen und spezifische Förderprogramme geeignete Maßnahmen sein. So hat beispielsweise Brasilien ein Biodieselprogramm, was sich speziell an Kleinbauern richtet: Um ein sogenanntes Sozialsiegel und die damit verbundenen Steuererleichterungen zu erhalten, müssen die Produzenten von Biodiesel einen Teil der Rohstoffe aus der familiären Landwirtschaft beziehen. Bislang läuft das Programm nicht ganz so erfolgreich wie erhofft, da Biodiesel vor allem aus Soja hergestellt wird, dessen Anbau in der Hand großer Produzenten liegt. Befürworter sehen darin jedoch lediglich Anfangsschwierigkeiten (Fatheuer, 2007).

Damit die großskalige Bioenergieproduktion nachhaltig und für breite Bevölkerungsschichten entwicklungsfördernd wirkt, sind neben der spezifischen Ausgestaltung der Bioenergiepolitik funktionsfähige öffentliche Institutionen (Governance-Kapazitäten) und eine gute Regierungsführung (good governance) notwendig. Dazu zählen vor allem effektive Verwaltungs- und Rechtstrukturen, die Gewährung von Rechtssicherheit und weitgehende Abwesenheit von Korruption, gerechte und gesicherte Verteilung von Verfügungs- und besonders von Landrechten, faire Partizipationsmöglichkeiten einschließlich wirtschaftlicher Rechte sowie wirksame Arbeitnehmerschutzvorschriften und Umweltschutzvorgaben.

die ihren Strombedarf fast ausschließlich aus erneuerbaren Energiequellen wie Wasserkraft decken, können Biokraftstoffe im Verkehr durch den Ersatz von fossilem Erdöl eine höhere Klimaschutzwirkung entfalten als im Stromsektor.

8.2.3.2
Bioenergie als Wärme- und Lichtquelle

Die wichtigste Energiedienstleistung in Entwicklungsländern ist die Bereitstellung von Wärme für die Zubereitung von Nahrung und Heizung. In der Modernisierung der traditionellen Biomassenutzung liegt ein Schlüsselelement zur nachhaltigen Energieversorgung. Die Produktion und Wartung von verbesserten Holzherden und Klein-Biogasanlagen sowie den dazu gehörigen Biogasherden erfordert lediglich einfache Handwerkerkenntnisse und ist in Südostasien seit Jahren ein Erfolg mit vielen klaren Vorteilen für alle Beteiligten (ter Heegde, 2005; ADB, 2008b).

Industrielle Prozesswärme kann alternativ zur bisherigen Form der Wärmegewinnung, beispielsweise der Feuerung mit Erdgas oder Mineraldiesel, direkt aus Holzvergasern vorzugsweise aus Reststoffen bereitgestellt werden (Dasappa et al., 2003). Längerfristig bietet sich für die Wärmebereitstellung in Entwicklungsländern, wie auch schon in Industrieländern, Biomethan an, das über Gasnetze verteilt genutzt werden kann (Kap. 8.1).

Einer großen Zahl von Menschen in Entwicklungsländern dienen Kerosinlampen als Lichtquelle. Steigende Ölpreise führen dazu, dass sich viele Menschen diese Lichtquelle nicht mehr leisten können. Eine Abhilfe ist die lokale Herstellung und Nutzung von Pflanzenöl in Lampen. Diese sind zwar nicht so effizient wie Elektrolampen und verursachen Ruß; das Pflanzenöl kann aber lokal mit einfachsten Mitteln hergestellt werden. Vorteilhafter mit Blick auf die Raumluft, aber teurer, wäre die Nutzung von Biostrom in Elektrolampen.

8.2.3.3
Bioenergie zur Stromerzeugung – zentral und dezentral

Für ländliche Regionen in Entwicklungsländern bieten sich kleinskalige Technologien wie Pflanzenölmotoren und -generatoren zur lokalen dezentralen Stromversorgung an. Da der Wirkungsgrad eines Motors im stationären Betrieb höher ist als im mobilen, können Biokraftstoffe in der Stromerzeugung mehr fossile Kraftstoffe verdrängen und somit Treibhausgase vermeiden als im mobilen Einsatz im Verkehr (Kap. 8.2.3.1). Aggregate, die einen mit Biokraftstoffen betriebenen Verbrennungsmotor und einen Generator zur Stromerzeugung vereinen, können einerseits zur Stromerzeugung (kleine Netze für öffentliche Gebäude, Schulen, Krankenhäuser, Siedlungen) und andererseits bei Bedarf flexibel mechanische Energie bereitstellen für Anwendungen wie beispielsweise dem Mahlen von Lebensmitteln (Mais, Getreide) oder den Antrieb von Wasserpumpen. Im Verbund mit anderen erneuerbaren Energietechnologien wie Photovoltaik oder Kleinwasserkraft können solche Bioenergieaggregate als Hybridsystem die Stromversorgung in ländlichen Regionen erfüllen.

In urbanen, industrialisierten Regionen mit hohem Strombedarf können für die Verwertung von Abfall- und Reststoffen als auch nachhaltig angebauten Energiepflanzen die gleichen Anlagen zur Stromerzeugung wie in Industrieländern eingesetzt werden (Kap. 7.2 und 8.1). Dies umfasst sowohl Anlagen zur Vergärung und Vergasung von Biomasse zu Biomethan das anschließend verstromt wird als auch Anlagen zur direkten Verbrennung von Biomasse wie Heizkraftwerke oder der Mitverbrennung in fossil befeuerten Kraftwerken. In zentralen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen kann die Abwärme industriell, etwa zur Trocknung von Erntegut, genutzt werden. Ebenso wie in Industrieländern ist vor allem die Nutzung von Abfall- und Reststoffen zur Stromerzeugung sinnvoll. In stark landwirtschaftlich geprägten Ländern fallen erhebliche Mengen an Reststoffen an (z.B. Fischwirtschaft, Sägewerke, Tee- und Kaffeeplantagen), die energetisch genutzt werden können. Vor allem agroindustrielle Biogasanlagen und Heizkraftwerke sind für die Verwertung der Reststoffe geeignet, die idealerweise die Abwärme in den Herstellungsprozess ihrer Produkte einbinden.

8.2.3.4
Gesamtbewertung von Bioenergie in Entwicklungsländern

Wesentliche Fortschritte in der Überwindung von Energiearmut durch Bioenergie werden in Entwicklungsländern vor allem durch massive Effizienzsteigerungen bei der traditionellen Biomassenutzung erzielt werden können. Durch die Ablösung alter ineffizienter durch moderner Holzherde können sehr viel Feuerholz eingespart, Treibhausgasemissionen vermieden und Entwaldung verhindert werden. In lokalen Kreisläufen ist die Nutzung von Bioenergie zur Überwindung von Energiearmut sinnvoll (Kap. 9.2.2). Der Anbau von Energiepflanzen auf degradiertem Land kann bei geeigneter Auswahl von Anbausystemen und richtigem Management die

Kasten 8.2-4

Länderstudie Brasilien – Schwellenland mit langjähriger dezidierter Bioenergiepolitik

Mit einem Anteil von 40 % am südamerikanischen Energieverbrauch ist Brasilien der größte Energiekonsument des Subkontinents. Die Primärenergieversorgung wird vorwiegend mit Öl gedeckt (42,1 % im Jahr 2006). Weitere wichtige Energiequellen sind Wasserkraft (14,2 %), Energie aus Zuckerrohr (16,6 %) und traditionelle Biomassenutzung (13,5 %). Gas und Kohle spielen mit 8,3 % bzw. 1 % eine untergeordnete Rolle. Kernenergie macht nur 1,1 % des Energiemix aus, andere Erneuerbare 3,2 % (World Bank, 2007; MME und EPE, 2007). In der Stromversorgung dominiert vor allem Wasserkraft (ca. 77 % der Stromerzeugung im Jahr 2006), der Rest wird aus Biomasse, Gas, Kohle, und Kernenergie gewonnen sowie durch Importe gedeckt. Brasiliens Energieversorgung ist damit stark diversifiziert und weist einen vergleichsweise hohen Anteil an erneuerbaren Energien auf (ca. 45 % der Primärenergieversorgung in 2006; IEA, 2006a; GTZ, 2007a; MME und EPE, 2007).

Günstige klimatische Bedingungen und hohe potenzielle Flächenverfügbarkeit machen den Anbau von Energiepflanzen, insbesondere von Zuckerrohr, in Brasilien besonders attraktiv. Biomasse kann deshalb einen wesentlichen Beitrag zur Deckung des weiter steigenden brasilianischen Energiebedarfs leisten. Bereits heute ist Brasilien mit ca. 2 EJ pro Jahr nach China, Indien und den USA der viertgrößte Nutzer von Bioenergie (GBEP, 2008). Im Jahr 2006 wurden ca. 4,1 % des elektrischen Stroms aus Biomasse, hauptsächlich aus Zuckerrohr-Bagasse, für die industrielle Eigenversorgung gewonnen. Insgesamt 320 Zucker- und Ethanolmühlen verarbeiteten im gleichen Jahr 430 Mio. Tonnen Zuckerrohr für die Zucker- und Ethanolgewinnung (MME und EPE, 2007; GTZ, 2007a; GBEP, 2008). Etwa 50 % des brasilianischen Benzinbedarfs im Verkehrssektor werden derzeit mit dem gewonnenen Ethanol gedeckt und weitere 3,5 Mio. l exportiert (WI, 2007; GBEP, 2008). In der Ethanolproduktion belegte Brasilien im Jahr 2007 mit ca. 19 Mrd. l Platz 2 nach den USA (26,5 Mrd. l) (F.O. Licht zit. in OECD, 2008).

Das große Ethanol-Produktionsvolumen ist auf die langjährige gezielte Förderung durch die brasilianische Regierung seit den 1970er Jahren zurückzuführen. Angesichts des Ölpreisschocks von 1973 und gefallener Zuckerpreise wurde die Ethanolproduktion im Rahmen des Programms „Pro-Alcoól“ damals staatlich subventioniert. Zwischenzeitlich ist die brasilianische Ethanolproduktion auch ohne direkte Subventionen wettbewerbsfähig (GBEP, 2008). Ende 2004 wurde zudem von der brasilianischen Regierung ein breit angelegtes Programm zum Aufbau eines wettbewerbsfähigen Biodieselsektors (National Program of Production and Use of Biodiesel) gestartet. Von dem Programm sollen die ärmsten Regionen des Landes im Nordosten und im Amazonasgebiet profitieren. Mit dem „Social-Fuel“-Siegel soll garantiert werden, dass ein gewisser Anteil der Rohstoffe für Biodiesel von kleinen Familienbetrieben in armen Regionen bezogen wird (GBEP, 2008).

In Zukunft setzt die brasilianische Regierung gemäß des „Brazilian Agroenery Plan 2006–2011“ neben den Biokraftstoffen vermehrt auch auf Stromgewinnung aus Biomasse. Die Kraft-Wärme-Kopplung aus Zuckerrohrbagasse bietet hierfür großes Potenzial. Zudem sind Holz- und Papierabfälle, Reisschalen, Kokos- sowie Cashewnussschalen für die energetische Nutzung verfügbar. Auch die moderne Nutzung von Restbeständen aus Land- und Forstwirtschaft soll ausgebaut werden (Ministry of Agriculture, Livestock and Food Supply, 2006). Zudem kommt im Rahmen des Programms „Luz para Todos“ („Strom für alle“) zur ländlichen Elektrifizierung der Biomasse eine erhebliche Rolle zu. Weiter soll mit Hilfe des Programms PROINFA aus dem Jahr 2002 der Anteil von Wind, Biomasse und kleinen Wasserkraftwerken an der Stromproduktion insgesamt auf 3.300 MW gesteigert werden (GTZ, 2007a; GBEP, 2008).

Ein Schwerpunkt der brasilianischen Bioenergiestrategie liegt dennoch nach wie vor auf Biokraftstoffen. Brasilien will die Ethanolproduktion massiv ausbauen und auch das Exportvolumen weiter steigern (Ministry of Agriculture, Livestock and Food Supply, 2006). Brasiliens Ziel ist es, die weltweite Marktführerschaft bei der Biokraftstoffherstellung zu erreichen. Dazu wurden auch bereits mit einigen lateinamerikanischen, afrikanischen und asiatischen Entwicklungsländern, die über vergleichbare klimatische Produktionsbedingungen verfügen, Partnerschaftsabkommen zum Aufbau eines globalen Biokraftstoffmarktes geschlossen (Stecher, 2007; Biopact, 2007a,b).

Von vielen dieser Länder wird Brasilien als Vorbild für eine erfolgreich umgesetzte Bioenergiepolitik, die mit positiven sozioökonomischen Entwicklungen einhergeht, wahrgenommen. Es wird angenommen, dass die Zuckerindustrie ca. 1 Mio. Arbeitsplätze geschaffen hat und dadurch zudem 6 Mio. indirekte Arbeitsplätze entstanden sind (GBEP, 2008). Allerdings kämpft das Land mit massiven ökologischen und sozialen Problemen, die teilweise in direktem, zumindest aber in indirektem, Zusammenhang mit der Bioenergienutzung stehen. So ist beispielsweise eine großflächige Verdrängung des Amazonaswaldes durch die agrarische Nutzung zu beobachten, welche vor allem durch den Ausbau der Sojaproduktion und der Viehwirtschaft bedingt ist. Bei weiterem Ausbau der Zuckerrohrproduktion kann es jedoch auch zu indirekten Verdrängungseffekten kommen (Fatheuer, 2007; Bringezu und Schütz, 2008). Der Anbau von Zucker und Soja in Monokulturen, der verstärkte Einsatz von Pestiziden und Herbiziden, die gesundheitliche Belastung durch das immer noch praktizierte Abbrennen von Zuckerrohrfeldern vor der Ernte, die teilweise problematischen Arbeitsbedingungen der Plantagenarbeiter – welche die brasilianische Regierung laufend zu verbessern sucht – und mit der Ausweitung von Plantagen verbundene Umsiedelungen sowie die Nichtbeachtung traditioneller Landrechte werden von vielen Nichtregierungsorganisationen kritisch betrachtet (Stecher, 2007; Fritz 2007; GBEP, 2008).

Diesen Problemen muss sich die brasilianische Regierung vor einem weiteren Ausbau des Bioenergiesektors stellen. Grundsätzlich ist die Fokussierung auf die Produktion von Biokraftstoffen eine effektive Strategie zur Steigerung des exportgetriebenen Wachstums und zur Abkopplung des Verkehrssektors vom fossilen Energieverbrauch. Dennoch scheint es im Falle Brasiliens ratsam, den Ausbau der Bioenergienutzung mehr als bisher innerhalb strikter Nachhaltigkeitsleitplanken zu verfolgen, wie bereits formal im „Brazilian Agroenergy Plan 2006–2011“ festgelegt. Langfristig sollte auch Brasilien aufgrund der höheren Energieeffizienz von Elektromobilität (Kap. 8.1.) vor allem in Metropolregionen den Übergang in die Elektromobilität anstreben. Dann könnte Zuckerrohr als Ethanol auch in Gas- und Dampf-Kraftwerken, wobei in diesem Fall das Ethanol in der Turbine verbrannt wird, oder BHKW zur Stromerzeugung profitabel eingesetzt werden. Die Wandlung von Biomasse zu Biomethan und dessen flexible Verwendung beispielsweise in der Kraft-Wärme-Kopplung stellt aus energetischer Sicht ebenfalls einen effizienten Pfad dar.

Bodenqualität verbessern (Kap. 7.1), und der Handel mit Bioenergieträgern schafft Einkommen. Die Nutzung von Reststoffen aus der industriellen Produktion von Nahrungsmitteln in Biogas- und Vergasungsanlagen oder in Heizkraftwerken stellt eine klimafreundliche Art der Energiegewinnung dar, die in Entwicklungsländern gefördert werden sollte. Ein großskaliger Energiepflanzenanbau in Entwicklungsländern kann jedoch nur unter Beachtung sozialer Arbeitsstandards, geregelter Landnutzung und dem Vorrang der Ernährungssicherung nachhaltig sein (Kasten 8.2-3). Die Verwendung von Energiepflanzen ist in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen am effizientesten und darüber hinaus kann auf diesem Weg die höchste Klimaschutzwirkung erzielt werden, wenn fossile Stromproduktion ersetzt bzw. vermieden wird (Kap. 9.2.1). Somit kann die Stromerzeugung aus Biomasse im Verbund mit anderen erneuerbaren Energietechnologien einen wichtigen Beitrag zur ländlichen Elektrifizierung und Stromversorgung urbaner Zentren in Entwicklungs- und Schwellenländern leisten.

8.2.3.5 Technologieschritte zu einer nachhaltigen Bioenergienutzung in Entwicklungsländern

Verschiedene Technologieschritte können zur Überwindung der Energiearmut in Entwicklungsländern beitragen. Einige Technologien können besonders günstig und einfach umgesetzt werden. Dazu zählen der Einsatz von verbesserten Holzherden, Kleinbiogasanlagen und lokal erzeugtem und genutztem Pflanzenöl für Beleuchtung, Strom- und Krafterzeugung und auch für Mobilität. Wichtig ist in allen Schritten, die kulturellen Prägungen der Bevölkerung bei der Einführung der Technologie einzubeziehen und zu beachten. In der Entwicklungszusammenarbeit gilt es sicherzustellen, dass die Technologien angenommen und selbst gewartet werden können (Kap. 9.2). Bis zu einem gewissen Maß ist auch der Einsatz von Biokraftstoffen für den Verkehr gerechtfertigt, technisch effizienter und deshalb vorzuziehen ist ihre Anwendung jedoch in der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung in GuD-Kraftwerken oder BHKW. Bei der Produktion und Nutzung von Biokraftstoffen sind in jedem Fall die Priorität der Nahrungsmittelproduktion und die weiteren Nachhaltigkeitskriterien bzw. Standards zu beachten. Wie in Industrieländern soll ebenfalls die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen sowie eine Kaskadennutzung verstärkt und dem Anbau von Energiepflanzen vorgezogen werden. Einige Entwicklungsländer werden in den Status von Schwellen- und Industrieländern wechseln. Dort sollten ähnliche Pfade zur nachhaltigen Bioenergienutzung wie in Industrieländern verfolgt werden (Kap. 8.1).

Nachhaltige Produktion von Biomasse und Nutzung von Bioenergie: Synthese 9

Eine verstärkte Nutzung von Bioenergie muss sich daran messen lassen, inwieweit sie eine globale Energiewende in Richtung Nachhaltigkeit vorantreibt (Kap. 2.2). Maßstab für die Bewertung ist der Beitrag zum Klimaschutz (Kap. 9.2.1) sowie der Beitrag zur Überwindung der Energiearmut (Kap. 9.2.2). Die folgende Synthese basiert auf den Analysen der Kapitel 6, 7 und 8 und konkretisiert das Leitbild des WBGU für eine nachhaltige Bioenergienutzung.

9.1 Nachhaltige Produktion von Biomasse für die energetische Nutzung: Was ist zu beachten?

9.1.1 Biogene Abfall- und Reststoffe

Bei der Produktion von Biomasse für die energetische Verwendung muss grundsätzlich zwischen Abfall- und Reststoffen sowie Energiepflanzen unterschieden werden. Die Nutzung von biogenen Abfall- und Reststoffen für die Erzeugung von Energie hat den Vorteil, dass dafür keine zusätzlichen Landflächen benötigt werden und daher auch kaum Konkurrenzen mit bestehender Landnutzung entstehen. Die Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderungen und Anbau entfallen weitestgehend, so dass sich die Klimaschutzwirkung im Wesentlichen aus den Emissionen bei der Umwandlung und Nutzung der Bioenergieträger und den eingesparten Emissionen durch die Substitution fossiler Energieträger bestimmt. In vielen Fällen reduziert die energetische Nutzung biogener Abfallstoffe darüber hinaus weitere Treibhausgasemissionen wie z. B. Methanemissionen bei Gülle oder bei Deponien. Die Entnahme von Reststoffen aus land- oder forstwirtschaftlichen Ökosystemen für die energetische Nutzung darf allerdings nur eingeschränkt erfolgen, da sonst dem Boden zu viel organische Substanz entzogen würde (Kap. 6.1.2). Die Sicherung des Bodenschutzes – und damit auch des Klimaschutzes – bei der Reststoffnutzung sowie die Vermeidung von Schadstoffemissionen müssen bei der Abfall- und Reststoffnutzung gewährleistet sein. Insgesamt räumt der WBGU der energetischen Verwertung von biogenem Abfall sowie Reststoffen (einschließlich Kaskadennutzung) grundsätzlich eine höhere Priorität ein als der Nutzung von Energiepflanzen (Tab. 9.2-1).

9.1.2 Landnutzungsänderungen

Bei der Nutzung eigens angebauter Energiepflanzen kommt zusätzlich die Landnutzung ins Spiel. Die Berücksichtigung der durch den Energiepflanzenanbau ausgelösten Landnutzungsänderungen ist unverzichtbar, weil diese die Treibhausgasbilanzen der verschiedenen Bioenergienutzungspfade entscheidend beeinflussen. Direkt ausgelöste Landnutzungsänderungen sind einer Bewertung zugänglich, weil sie unmittelbar mit dem Energiepflanzenanbau verknüpft werden können. Wenn aber Ackerflächen auf den Anbau von Energiepflanzen umgestellt werden, dann wird die vorherige Agrarproduktion mit einer großen Wahrscheinlichkeit ganz oder teilweise auf andere Flächen verdrängt. Die dadurch ausgelösten indirekten Landnutzungsänderungen sind – neben den direkten Landnutzungsänderungen – der für die Bewertung der Treibhausgasbilanzen über die gesamte Wertschöpfungskette entscheidende Faktor, da etwa die Hälfte der Klimaschutzwirkung dadurch verloren gehen kann oder netto sogar Treibhausgase freigesetzt werden können. Die Abschätzung der Treibhausgasemissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen ist allerdings mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Ihre Quantifizierung setzt das Verständnis komplexer Zusammenhänge voraus und kann bisher nur durch Modelle erfolgen (Kap. 9.2.1.2). Eine globale Landnutzungsstrategie, die auf die Vermeidung von Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderung im Allgemeinen bzw. den Erhalt terrestrischer Kohlenstoffspeicher sowie auf die Erhaltung und nachhaltige Nutzung biologischer Vielfalt abzielt, sollte daher das langfristige Ziel sein (Kap. 10.3 und 10.5).

Der WBGU lehnt die direkte wie indirekte Umwandlung von Waldflächen und Feuchtgebieten in Agrarland für den Energiepflanzenanbau grundsätzlich ab, da sie in der Regel mit nicht kompensierbaren Treibhausgasemissionen verbunden und für die biologische Vielfalt und den Kohlenstoffspeicher im Boden grundsätzlich negativ zu bewerten ist (Kap. 4.2). Auch die Umnutzung von Grasland zu Ackerland mindert die Klimaschutzwirkung.

Die Umnutzung von Flächen für den Energiepflanzenanbau ist aus Sicht des WBGU nur dann sinnvoll, wenn die aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen verursachten Treibhausgas-Emissionen inklusive der entgangenen Senkenwirkung auf der Fläche die CO_2-Menge nicht überschreitet, die auf der entsprechenden Fläche innerhalb von 10 Jahren durch den Energiepflanzenanbau (d.h. auf der Fläche und in den Ernteprodukten) wieder fixiert werden kann. In diese Betrachtung sollten auch Emissionen, die durch den Anbau zu erwarten sind (etwa N_2O-Emissionen durch den Düngemitteleinsatz) einbezogen werden. In der Regel können durch die Substitution fossiler Energieträger durch Bioenergie maximal so viel Treibhausgasemissionen eingespart werden, wie dem in der Biomasse gespeicherten Kohlenstoff entspricht (Kap. 6.4.3.3).

Aus Gründen der Ernährungssicherung sollte der Energiepflanzenanbau auf solche Flächen beschränkt werden, deren Umnutzung für die Bioenergieproduktion wenig Konkurrenz mit der Nahrungsproduktion erwarten lässt, um das Risiko indirekter Landnutzungsänderungen gering zu halten. Daher ist der Anbau von Energiepflanzen auf marginalem Land (Flächen mit eingeschränkter Produktions- oder Regelungsfunktion; Kasten 4.2-1) zu bevorzugen. Auch hierbei müssen die Interessen lokaler Bevölkerungsgruppen berücksichtigt werden, die marginales Land etwa als Weideland nutzen. Außerdem muss eine vorherige Bewertung des Naturschutzwerts erfolgen. Als besonders vorteilhaft für den Klimaschutz erweisen sich marginale, insbesondere degradierte Flächen, bei denen die Umnutzung für den Energiepflanzenanbau zu einer Akkumulation von Bodenkohlenstoff führen kann. Beispiele sind der Anbau von Ölpalmen oder *Jatropha* auf degradierten Flächen in den Tropen. In diesen Fällen lassen sich auch besonders kostengünstige Treibhausgaseinsparungen erzielen.

9.1.3 Anbausysteme

Der WBGU verwendet als Kriterien für die Nachhaltigkeit von Anbausystemen die Wirkungen auf biologische Vielfalt und die Kohlenstoffspeicherung im Boden. Bioenergie ist nur dann als nachhaltige Energieform zu bezeichnen, wenn auf den Ernteflächen dauerhaft so viel Biomasse nachwächst wie energetisch genutzt wird, wenn also die Bodenfruchtbarkeit dauerhaft gesichert werden kann. Nur unter dieser Voraussetzung ist auch die Annahme berechtigt, dass der von den Energiepflanzen aus der Atmosphäre aufgenommene und gespeicherte Kohlenstoff, der bei der energetischen Nutzung in Form von CO_2 wieder freigesetzt wird, nicht zu einem Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration führt und daher nicht als Emission betrachtet werden muss. Um die durch die Bioenergie ausgelösten Landnutzungskonkurrenzen gering zu halten müssen zusätzlich die unterschiedlichen Flächenerträge berücksichtigt werden.

Nach diesen Maßgaben schneiden mehrjährige Kulturen wie *Jatropha*, Ölpalme, Kurzumtriebsplantagen (schnellwachsende Hölzer) und Energiegräser besser ab als einjährige Anbaukulturen wie Raps, Getreide oder Mais. Mehrjährige Kulturen sind daher nach Ansicht des WBGU grundsätzlich zu bevorzugen (Tab. 9.2-1). Wo immer möglich, sollten statt Monokulturen Pflanzenmischungen für die Biomasseproduktion verwendet werden, zumal es Hinweise gibt, dass Grasland mit größerer biologischer Vielfalt auch mehr Ökosystemleistungen bereitstellen kann (Kap. 7.1.4). Bei Auswahl geeigneter Anbausysteme kann zusätzlich organischer Kohlenstoff in den Boden eingetragen werden, was sowohl die Treibhausgasbilanz als auch die Bodenfruchtbarkeit verbessert. Dabei muss unsachgemäße Stickstoffdüngung vermieden werden, da sie u.a. zu N_2O-Emissionen führt. Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Holzprodukten schätzt der WBGU das Bioenergiepotenzial aus Zuwächsen in der Forstwirtschaft als gering ein (Kap. 5.3.2).

9.2 Wandlung, Anwendung und Einbindung von Bioenergie – Nutzung von Bioenergie

Aus Sicht der beiden Ziele des vom WBGU entwickelten Leitbilds für eine nachhaltige Bioenergienutzung (Kap. 10) ergeben sich jeweils unterschiedliche Perspektiven auf die Bioenergie. Auf die Klimaschutzwirkung (Kap. 9.2.1) haben nach der Bereitstellung der Biomasse sowohl die Art der Umwandlung von Biomasse in anwendbare Produkte wie z.B. Gase, Pflanzenöle, Biokraftstoffe oder Holzpellets als auch die Art der Anwendung, etwa in der Mobilität, in der Heizung oder in der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), einen wichtigen Einfluss. Dieser fällt allerdings in der Regel weniger ins Gewicht als der Beitrag, der durch direkte oder indirekte Landnut-

zungsänderungen als Folge der Produktion der Energieträger ausgelöst werden. Bei der Anwendung im Energiesystem ist entscheidend, welcher Energieträger durch die Biomasse ersetzt wird und wie groß die Verluste im Konversionspfad sind. Die geschickte Einbindung der Bioenergie in die bestehenden Energiesysteme und deren Beitrag zu einem nachhaltigen Umbau der Energiesysteme ist also von großer Bedeutung. Die Maximierung der Klimaschutzwirkung sollte vor allem in Industrieländern, aber auch in den sich rasch entwickelnden urbanen und industrialisierten Regionen von Schwellen- und Entwicklungsländern im Vordergrund stehen, eingeschränkt aber auch in Entwicklungsländern. Zwar haben Entwicklungs- und Schwellenländer noch keine internationalen Verpflichtungen zur quantitativen Begrenzung ihrer Treibhausgasemissionen. Trotzdem ist auch in diesen Ländern der Aufbau möglichst moderner, energieeffizienter und kostengünstiger Technologien voranzutreiben und damit der Klimaschutz eine wichtige Richtschnur.

Für die Überwindung der Energiearmut (Kap. 9.2.2) geht es zunächst um die Modernisierung der traditionellen Bioenergienutzung und um den Zugang zu modernen Energieformen wie Strom und Gas. Beides sind Herausforderungen, die vor allem in den ländlichen Regionen von Entwicklungsländern im Vordergrund stehen. Eine positive Klimaschutzwirkung kann Bioenergie auch in diesem Umfeld erreichen.

9.2.1 Klimaschutz

9.2.1.1 Minderung von Treibhausgasen durch Bioenergienutzung: Messung und Standardsetzung

Zur Messung des Beitrags der Bioenergie zum Klimaschutz wird bislang vielfach der Parameter „prozentuale Treibhausgasminderung gegenüber einem Referenzsystem bezogen auf die End- bzw. Nutzenergie“ verwendet (z.B. in den vom Rat der Europäischen Union vorgeschlagenen Nachhaltigkeitskriterien für flüssige Biokraftstoffe im Rahmen der geplanten EU-Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien; Kasten 10.3-2). Dieser Parameter beschreibt die Klimaschutzwirkung, die durch die Produktion einer bestimmten Menge an Energie durch Biomasse erzielt werden kann, ohne zu hinterfragen, welche Menge an Biomasse zur Erzeugung dieser Energie notwendig ist. Der begrenzende Faktor für den Klimaschutz durch Biomasse ist jedoch nicht die nachgefragte Energie, die potenziell durch Bioenergie ersetzt werden könnte, sondern die Menge an nachhaltig verfügbarer Biomasse.

Der WBGU hält für den Vergleich der Klimaschutzwirkung verschiedener Nutzungsoptionen von Biomasse daher das absolute Treibhausgasminderungspotenzial bezogen auf die Anbaufläche bzw. bezogen auf die Menge an eingesetzter Biomasse für maßgeblich (Abb. 7.3-5a,b und 7.3-6). Diese beiden Parameter bilden auch eine gute Grundlage für die Standardsetzung. Konkret empfiehlt der WBGU, dass Bioenergie nur dann genutzt werden sollte, wenn über den gesamten Lebenszyklus, einschließlich der Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen, eine Treibhausgasminderung von mindestens 30 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse erreichbar ist (Kap. 10.3). Im Biokraftstoffbereich entspricht eine solche Vorgabe in etwa der Anforderung, die Emissionen bezogen auf die Endenergie um 50 % gegenüber dem fossilen Referenzsystem zu senken. Als Voraussetzung für eine staatliche Förderung schlägt der Beirat den doppelten Wert von mindestens 60 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse vor (Kap. 7.3; Tab. 9.2-1). Dieser Zahlenwert entspricht gut der Hälfte der nach heutigen Technologien erreichbaren Klimaschutzwirkung (Kap. 7.3.2). Der WBGU möchte an dieser Stelle betonen, dass ein Standard, der eine bestimmte Klimaschutzwirkung von Bioenergienutzung vorschreibt, als eine Übergangslösung zu betrachten ist. Nicht zuletzt haftet solchen quantitativen Vorgaben eine gewisse Willkür in der Festlegung des Zahlenwerts an. Grundsätzlich ist daher ein globales System verpflichtender Begrenzungen von Treibhausgasemissionen anzustreben, das alle relevanten Quellen inklusive aller Emissionen aus Landnutzung und Landnutzungsänderungen umfasst (Kap. 10.2).

9.2.1.2 Berücksichtigung indirekter Landnutzungsänderungen

Der Beirat hält die Berücksichtigung der Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen bei der Bilanzierung der Klimaschutzwirkung von Bioenergie für unverzichtbar. Die Quantifizierung dieser Effekte steht wissenschaftlich noch am Anfang, so dass es derzeit noch keine anerkannte Methode gibt, die auf einem wissenschaftlichen Konsens beruht. Dennoch ist es notwendig, die Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen bereits jetzt in die Treibhausgasbilanzen bei der Standardsetzung einzubeziehen.

Jede indirekte Landnutzungsänderung ist zwar gleichzeitig an einem anderen Ort eine direkte Landnutzungsänderung und als solche ist sie im Prinzip

erfassbar und die Emissionen sind quantifizierbar. Allerdings ist der kausale Zusammenhang mit dem Energiepflanzenanbau nicht direkt überprüfbar. Der Beirat schlägt vor, vorläufig als Methode für die Berechnung der Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen den vom Ökoinstitut entwickelten „iLUC-Faktor“ (Fritsche und Wiegmann, 2008; Kasten 7.3-1) zu verwenden, der eine erste, wenn auch grobe Einschätzung erlaubt. Die Weiterentwicklung dieses Parameters ist eine wichtige Forschungsaufgabe (Kap. 11).

Da die indirekten Effekte berücksichtigt werden müssen, führt die Umnutzung von Ackerland für den Anbau von einjährigen Energiepflanzen in temperaten Regionen zu derart hohen Emissionen, dass sie bei den heute üblichen Biokraftstoffpfaden im Verkehr im Verlauf von 20 Jahren noch nicht kompensiert werden können (Kap. 7.3.2). Im Vergleich mit diesen Pfaden wäre also eine Fortführung der Nutzung fossiler Kraftstoffe im Verkehr die für den Klimaschutz bessere Option. Bei der Nutzung von Biomasse für die Stromerzeugung bzw. im KWK-Bereich bleibt eine Klimaschutzwirkung auch bei Berücksichtigung der indirekten Landnutzungsänderungen erhalten, diese ist aber nur noch etwa halb so groß wie ohne die Berücksichtigung indirekter Effekte (Abb. 7.3-6).

Bei der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen entstehen nur wenig Emissionen durch Landnutzungsänderungen, weshalb sie in der Regel in der Bilanzierung vernachlässigt werden können.

9.2.1.3 Substitution fossiler Energieträger

Aus Sicht des Klimaschutzes erscheinen zunächst diejenigen Anwendungsbereiche am attraktivsten, bei denen fossile Energieträger mit hohen CO_2-Emissionen verdrängt werden. Daher lassen sich durch die Verdrängung von Kohle am meisten Treibhausgase einsparen, während durch Substitution von Erdölprodukte geringere und durch Substitution von Erdgas die geringsten Einsparungen im Bereich fossiler Energieträger zu erwarten sind. Eine Konkurrenz oder gar Verdrängung anderer erneuerbarer Energieträger durch Bioenergie sollte auf jeden Fall vermieden werden.

9.2.1.4 Klimaschutzwirkung unterschiedlicher technischer Anwendungen/Nutzungspfade

Neben den Landnutzungsänderungen bei Energiepflanzen ist für eine hohe Klimaschutzwirkung von Bioenergie das technische Anwendungsfeld entscheidend. Im Folgenden werden die vom WBGU untersuchten Anwendungen unter den Gesichtspunkten ihrer Klimaschutzwirkungen und der Treibhausgasvermeidungskosten betrachtet (Tab. 9.2-1).

Mitverbrennung von Biomasse in Kraftwerken

Bei der Produktion von Hackschnitzeln oder Pellets auf der Grundlage von Biomasse aus Lignozellulose, d.h. z.B. Restholz oder Holz aus Kurzumtriebsplantagen, treten nur geringe Umwandlungsverluste auf. Werden diese Produkte anschließend in großen Kraftwerken als Brennstoff neben Kohle genutzt (Mitverbrennung), ergibt sich sowohl bei kombinierter Strom- und Wärmebereitstellung (Kraft-Wärme-Kopplung, KWK) als auch bei konventionellen Kohlekraftwerken ohne Wärmeauskopplung eine sehr günstige Klimaschutzwirkung bei moderaten CO_2-Vermeidungskosten. Besonders positiv ist hierbei die Nutzung biogener Reststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft, da diese kaum Emissionen aus Landnutzungsänderungen verursachen. Die Mitverbrennung von Biomasse in Kohlekraftwerken sollte jedoch nicht dazu führen, dass die Nutzung konventioneller Kohlekraftwerke als zukunftsfähig eingeschätzt und länger als notwendig fortgesetzt wird, denn dadurch würden wenig zukunftsfähige Lock-in-Effekte befördert. Daher sollte die Mitverbrennung nur in besonders klimafreundlichen Kraftwerken mit Wärmeauskopplung gefördert werden.

Stromerzeugung und KWK-Anlagen

Das Treibhausgasvermeidungspotenzial bezogen auf die Menge an eingesetzter Biomasse liegt bei der Verwendung von Biomasse zur Stromerzeugung bzw. zur kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung (KWK) und in hocheffizienten Großkraftwerken wie etwa Gas-und-Dampfkraftwerken (GuD-Kraftwerke) im Vergleich mit anderen Anwendungen am höchsten. Der überwiegende Teil der vom WBGU untersuchten Pfade im Bereich der reinen Wärmeerzeugung und der Nutzung als Biokraftstoff in der Mobilität erreicht nur etwa die Hälfte der Treibhausgaseinsparung, die im Strombereich erzielt werden können. Wegen ihres hohen energetischen Wirkungsgrads aufgrund der Abwärmenutzung ist die KWK-Technologie grundsätzlich der reinen Stromproduktion vorzuziehen, sofern die Wärme sinnvoll genutzt werden kann. Für Regionen mit hohem Kälte- bzw. Kühlbedarf lässt sich die KWK z.B. mit Hilfe von Absorptionskälteprozessen auch zur Kälteerzeugung einsetzen. Durch die Nutzung von Holz (bevorzugt aus Reststoffen) in der Direktverbrennung mit KWK ist bei geringen Vermeidungskosten eine sehr gute Klimaschutzwirkung erreichbar.

Biogasanlagen, die Rest- und Abfallstoffe vergären, können effizient zur Strom- und Wärmebereitstellung bei hoher Klimaschutzwirkung und sehr geringen Vermeidungskosten eingesetzt werden. Als Substrat für Biogasanlagen eignen sich auch Energiepflanzen, die eine hohe Produktivität aufweisen (z.B. Gräser), falls die Emissionen aus Landnutzungsänderungen gering sind. Das auf diesem Weg gewonnene Biogas kann zu Biomethan aufbereitet und über das Erdgasnetz transportiert und zur Stromerzeugung oder in KW-Anlagen genutzt werden.

GuD-Kraftwerke sind die effizienteste heute etablierte Technologie zur Stromerzeugung aus Erdgas bzw. Biomethan, zukünftig ist noch eine Effizienzsteigerung durch den Einsatz von Brennstoffzellen zu erwarten. Alle dieser Pfade zeigen vergleichbar hohe Treibhausgasvermeidungspotenziale, wobei sich die Vermeidungskosten aber erheblich unterscheiden. Die Herstellung von Biomethan in Biomassevergasungsanlagen ist zwar heute noch nicht konkurrenzfähig, die weitere Technologieentwicklung lässt jedoch eine deutliche Kostenreduktion erwarten (Kap. 7.2.5.2).

Heizung mit Biomasse

Im Bereich der ausschließlichen Wärmerzeugung hat der WBGU Pelletheizungen auf der Basis von Reststoffen und Energiepflanzen (Kurzumtriebsplantagen) untersucht. Das Treibhausgasminderungspotenzial dieser Pfade ist deutlich geringer als die erreichbaren Minderungen im Strombereich. Dies liegt u.a. daran, dass bei der Nutzung von Bioenergie im Wärmesektor die Substitution von Erdöl und Erdgas erfolgt, die geringere energiebezogene Emissionen aufweisen als Kohle. Wenn Holz aus Kurzumtriebsplantagen genutzt wird, die auf Ackerflächen angelegt wurden, wird die Klimaschutzwirkung des untersuchten exemplarischen Nutzungspfades durch die erwarteten Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen sogar vollständig aufgehoben. Bei ausschließlicher Wärmenutzung sind im Durchschnitt der betrachteten Technologien bei eher hohen Vermeidungskosten nur etwa die Hälfte der absoluten Treibhausgasminderungen erreichbar, wie bei kombinierter Strom- und Wärmenutzung über KWK. Bei größeren Anlagen wie beispielsweise Hackschnitzelheizungen oder Heizwerken sind tendenziell geringere Wärmegestehungskosten und daher auch. Vermeidungskosten zu erwarten. Die Klimaschutzwirkung pro Rohstoff Biomasse ist jedoch in der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung in der Regel höher als in der reinen Wärmenutzung, weshalb die KWK-Pfade den reinen Wärmenutzungspfaden vorzuziehen sind.

Kraftstoffe für den Verkehr

Bei Verwendung von Reststoffen (z.B. Restholz, Gülle, Stroh) schneidet die Verwendung von Biokraftstoffen im Verkehr ähnlich wie die Wärmeerzeugung vergleichsweise ungünstig ab: Mit wenigen Ausnahmen reduziert sich die Treibhausgaseinsparung bezogen auf die eingesetzte Menge an Biomasse im Vergleich zur Anwendung im Strombereich auf mindestens die Hälfte.

Die Produktion und Verwendung von Biokraftstoffen in konventionellen Verbrennungsmotoren ist eine sehr ineffiziente Rohstoffnutzung. Nur ca. 5–10 % der in der Pflanze bzw. der Biomasse gespeicherten Energie kann als Antriebsenergie im Verkehr genutzt werden (Kap. 8.1). Darüber hinaus führt die Nutzung von Biokraftstoffen im Verkehr sogar sogar zu höheren Emissionen als die Nutzung von fossilen Kraftstoffen (Abb. 7.3-5), wenn als Substrat Biomasse aus temperaten, einjährigen Energiepflanzen (z.B. Mais, Raps) verwendet wird (Kap. 9.1.3), deren Anbau hohe Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen verursachen (Kap. 9.2.1.2). Die Energiebilanz der Nutzung von Biokraftstoffen der zweiten Generation fällt nicht grundsätzlich besser aus als die der ersten Generation, da hier zwar die ganze oberirdische Pflanze genutzt werden kann, aber bei der Umwandlung in Biokraftstoff etwa die Hälfte des ursprünglichen Energiegehalts der Biomasse verloren geht (Abb. 8.1-9).

Für die Zukunft der Mobilität im Straßenverkehr hält der WBGU die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Kombination mit elektrischen Fahrzeugen für die sinnvollste Lösung. Ein mit Bioenergie betriebenes Fahrzeug erreicht bei gleichem Biomasseeinsatz die höchste Reichweite, wenn es Strom aus Biomasse in einem Elektroantrieb nutzt und nicht Biokraftstoffe im Verbrennungsmotor verwendet (Abb. 8.1-10). Für diesen Pfad sind zwar heute die Klimaschutzkosten noch sehr hoch. Bei großskaliger Einführung elektrischer Fahrzeuge lassen sich die Kosten aber innerhalb von 15–20 Jahren vor allem für die heute noch sehr teure Speicherbatterie drastisch reduzieren, so dass sich auch die Treibhausgasvermeidungskosten verringern dürften (Kap. 7.2). Der Einsatz der Elektromobilität ist allerdings erst mittelfristig ökologisch vorteilhaft. Erst ab einem gewissen Wirkungsgrad der Stromwandlung ist Elektromobilität technisch effizienter als die herkömmliche Antriebstechnik. Noch befindet sich der Elektroantrieb für Serienfahrzeuge bis auf Hybridfahrzeuge im Entwicklungsstadium. Eine Schwachstelle sind vor allem die Batterien, die viel Energie speichern, dabei leicht sein und eine lange Lebensdauer haben sollen. Letztendlich schöpft nur die Kombination von Elektroantrieb und direkt erzeugtem, erneuerbarem

Strom aus Solar-, Wasser- und Windenergie das Effizienzpotenzial der Elektromobilität voll aus.

Über die Elektromobilität erzielt die Bioenergienutzung eine deutlich höhere Klimaschutzwirkung als die Beimischung von Biokraftstoffen zu im Verkehr genutzten fossilen Kraftstoffen. Aus diesem Grund sollte den Nutzungspfaden, die aus Bioenergie Strom und Wärme erzeugen, der Vorzug gegenüber der Nutzung von Biokraftstoffen im Mobilitätssektor gegeben werden. Der WBGU hält daher die Produktion von Biokraftstoffen für den Straßenverkehr in Industrieländern grundsätzlich nicht für eine geeignete Klimaschutzoption. Der WBGU empfiehlt daher den raschen Ausstieg aus der Förderung von Biokraftstoffen für den Verkehr. Die Quoten zur Beimischung von Biokraftstoffen zu fossilen Kraftstoffen sollten eingefroren und innerhalb der nächsten drei bis vier Jahre ganz zurückgenommen werden.

Biokraftstoffpfade mit tropischen, mehrjährigen Energiepflanzen wie *Jatropha*, Ölpalmen oder Zuckerrohr zeigen bei Anbau auf marginalem Land dagegen eine gute Klimaschutzwirkung bei moderaten Kosten. Die zusätzliche Speicherung von Kohlenstoff im Boden durch den Anbau sowie die Vermeidung indirekter Landnutzungsänderungen wirken sich positiv auf die Klimaschutzwirkung aus. Werden dieselben Pflanzen allerdings auf Ackerland angebaut und verursachen so indirekte Landnutzungsänderung, oder wird für den Anbau direkt Wald gerodet, so verursacht die Nutzung meist erhebliche Mehremissionen gegenüber fossilen Kraftstoffen. Hier liegen also ein großer Nutzen und ein großer Schaden nahe beieinander (Kap. 7.3.2). Aufgrund der teilweise sehr niedrigen THG-Vermeidungskosten sind einige dieser Pfade auch für die Förderung durch internationaler Klimaschutzinstrumente interessant.

Da es heute noch keine etablierten Nachhaltigkeitsstandards für Biokraftstoffe aus tropischer Produktion gibt, sind Import und Nutzung dieser Biokraftstoffe problematisch.. Nach Einführung entsprechender Standards und Zertifizierungsverfahren (Kap. 10.3) kann die Förderung des Import von Pflanzenölen und Bioethanol sinnvoll sein, wenn sichergestellt werden kann, dass sie die Förderkriterien erfüllen (Kap. 10.3.1.2). Um eine größtmögliche Klimaschutzwirkung zu erzielen, ist auch nach Vorliegen des Nachweises der Nachhaltigkeit bei diesen Biokraftstoffen die Verwendung in KWK-Anlagen bzw. für die Stromerzeugung der Nutzung für die Mobilität vorzuziehen, wenn dadurch Kohle substituiert wird. So kann z.B. in Brasilien Bioethanol aus nachhaltigem Zuckerrohranbau auch in effizienten GuD-Kraftwerken, wobei das Ethanol in der Turbine verbrannt wird, zur kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt werden.

Biomethan

Biomethan kann als vielversprechende Zukunftsoption eingestuft werden (Kasten 7.2-2). Biomethan, das durch Vergärung feuchter Biomasse hergestellt wird, ist bereits heute eine sehr kostengünstige Klimaschutzoption, wenn es etwa in BHKW zum Ersatz von Kohle eingesetzt wird. Verfahren zur Produktion von Biomethan aus fester Biomasse über die Vergasung sind heute vergleichsweise teuer, der WBGU erwartet hier aber zukünftig eine deutliche Kostenreduktion. Über beide Pfade der Biomethanherstellung lassen sich beim Einsatz zur Stromerzeugung hohe absolute Treibhausgasminderungen bezogen auf die eingesetzte Menge an Biomasse erzielen, die mit anderen Strompfaden (etwa der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken oder dem Einsatz von Hackschnitzeln in Heizkraftwerken) vergleichbar sind. Darüber hinaus ist es bei beiden Verfahren der Biomethanproduktion notwendig, CO_2 aus den Bio- bzw. Produktgas abzutrennen. Sollte sich die Möglichkeit ergeben, dieses CO_2 zukünftig auf nachhaltige Weise einzulagern, mindert dies die spezifischen Emissionen der Biomethanpfade, so dass sich die Klimaschutzwirkung weiter erhöht. Zu den Anforderungen an eine nachhaltige Sequestrierung hat der WBGU an anderer Stelle Empfehlungen gegeben (WBGU, 2006). Biomethan lässt sich einfach über das Erdgasnetz transportieren und kann so einerseits Nutzern zugeführt werden, denen eine optimale Abwärmenutzung bei der KWK möglich ist oder das Biomethan kann auch aus dezentralen Anlagen gesammelt und der höchsteffizienten Nutzung in großen GuD-Anlagen zugeführt werden.

9.2.2 Energiearmut

Die Überwindung der Energiearmut vor allem in den ländlichen Regionen der Entwicklungsländer, aber auch in urbanen Räumen, ist eine entscheidende Voraussetzung für die Armutsbekämpfung insgesamt. Energiearmut bedeutet, dass Wahlmöglichkeiten beim Zugang zu erschwinglichen, zuverlässigen, qualitativ hochwertigen, sicheren, gesundheitlich unbedenklichen und umweltschonenden Energiedienstleitungen zur Befriedigung der Grundbedürfnisse geschaffen werden müssen, vor allem durch Zugang zu Elektrizität und Gas (WBGU, 2003a; Kap. 2). Für ländliche Räume bieten sich für die Wärme- und Stromgewinnung vor allem klein- bis mittelskalige, netzunabhängige Technologien an. Sie bieten einen großen Hebel, um in kurzer Zeit und kostengünstig die Lebensqualität vieler hundert Millionen Menschen deutlich zu verbessern. Die traditionelle Biomassenutzung stellt 90 % der derzeit weltweit genutz-

ten Bioenergie dar. Vor allen anderen Maßnahmen ist eine Modernisierung dieser Nutzung voranzutreiben, da hier z.B. wegen der Steigerung der Effizienz ein großer Beitrag zur Überwindung der Energiearmut geleistet werden kann. Die Nutzung Bioenergie kann in diesem Bereich zur Überwindung der Energiearmut beitragen. In Städten sind die Möglichkeiten zur Bekämpfung der Energiearmut vielfältiger, jedoch besteht beim Zugang zu Energiedienstleistungen vor allem ein Verteilungsproblem.

Die größerskalige, moderne Bioenergieproduktion und -nutzung, die ebenfalls zur Bekämpfung der Energiearmut in Entwicklungsländern beitragen kann, sollte grundsätzlich unter dem Aspekt der Klimaschutzwirkung betrachtet werden (Kap. 9.2.1). Bei günstigen Treibhausgasvermeidungskosten der jeweiligen Bioenergiepfade können neue Finanzierungsquellen über internationale Klimaschutzinstrumente erschlossen werden. Daher sollten solche Konversionspfade für die Bioenergienutzung angestrebt werden, die bei relativ hoher Vermeidungsleistung pro Menge eingesetzter Biomasse geringe Vermeidungskosten haben.

Holz- und Holzkohleherde

Der WBGU empfiehlt als internationale Zielsetzung, bis 2030 den vollständigen Ausstieg aus den gesundheitsschädlichen Formen der traditionellen Bioenergienutzunganzustreben. Dazu können einige Technologien bereits heute schnell und kostengünstig umgesetzt werden. Mit dem Einsatz von verbesserten Kochherden kann der Brennstoffverbrauch bei gleichem Nutzen auf die Hälfte oder ein Viertel verringert und gleichzeitig die Gesundheitsgefährdung drastisch reduziert werden. Besonders Frauen und Mädchen, zu deren Aufgaben das Feuerholzsammeln in Entwicklungsländern vorrangig zählt, können so zeitlich entlastet werden. Dadurch bleibt mehr Zeit für Erwerbstätigkeit oder Bildung (Kap. 8.2). Das gilt sowohl für einfache Holzherde wie auch für einfache Holzkohleherde, die besonders in urbanen Zentren weit verbreitet sind.

Kleinbiogasanlagen

Durch Kleinbiogasanlagen können Reststoffe, wie z.B. tierische Exkremente, zu Methan umgewandelt und zum Kochen und Beleuchten verwendet werden (Kap. 7.2.4). Durch diese Anlagen kann ebenfalls Feuerholz eingespart und die Innenraumluft verbessert werden. Zwar erzielt diese Technologie nicht den höchsten Wirkungsgrad, ist jedoch ein vertretbarer Kompromiss zwischen einfacher Handhabung, Installation und Wartung, dem energetischen Nutzen und der Kosten der Energiedienstleistung. Besonders geeignet ist diese Technologie für Haushalte, Schulen und öffentliche Einrichtungen (Kap. 8.2.2)

Biomassevergasungsanlagen

Biomassevergasungsanlagen, die Abfälle und Reststoffe wie Kokosnussschalen, Altholz, Kaffee- und Reisspreu verwerten, können zur Stromproduktion oder auch zur Wärmegewinnung eingesetzt werden. Diese Technologie eignet sich je nach Größe der Anlage sowohl für Haushalte als auch für ländliche Gemeinschaften. Das Rohgas kann beispielsweise direkt zur Prozesswärmeerzeugung in Trocknungsanlagen oder Bäckereien genutzt werden. Holzvergaser nutzen ein flexibles, breites Rohstoffspektrum und können zudem über Generatoren zur ländlichen Elektrifizierung beitragen(Kap. 7.2.4 und 8.2.2).

Pflanzenölmotoren, Aggregate und Blockheizkraftwerke

Aus Ölpflanzen (z.B. *Jatropha*, Ölpalmen) kann dezentral mit einfachen mechanischen Pressen unraffiniertes Pflanzenöl hergestellt werden. Damit können mittels Verbrennungsmotoren verschiedene stationäre Maschinen wie Getreidemühlen oder Wasserpumpen betrieben werden. Verbrennungsmotoren können zudem mit einem Generator zu einem Aggregat gekoppelt und zur Stromversorgung (z.B. Öffentliche Gebäude, Krankenhäuser, Schulen, Mini-Grids) verwendet werden. Diese Technologie hat ein großes Potenzial in der ländlichen netzfernen Elektrifizierung, da sie wartungsarm und relativ einfach handhabbar ist (Kap. 7.2.4). Die Abwärme der Aggregate kann z.B. in der Trocknung von landwirtschaftlichen Produkten genutzt werden. Größere mit nachhaltig produziertem Pflanzenöl betriebene Blockheizkraftwerke können auch in urbanen, industriellen Regionen zur Elektrifizierung eingesetzt werden und in großer Anzahl auch große fossile Kraftwerke wie etwa Kohlekraftwerke ersetzen oder deren Neubau überflüssig machen.

9.2.3 Bioenergie als Brückentechnologie

Die nachhaltige Nutzung von Bioenergie aus Energiepflanzen kann aus zwei Gründen bis etwa Mitte des Jahrhunderts eine wichtige Brückentechnologie in eine erneuerbare Energiezukunft sein.

Zum einen wird voraussichtlich erneuerbare Energie danach überwiegend direkt erzeugt werden: durch Wind- und Wasserkraft, ab Mitte des Jahrhunderts auch im großen Stil durch Solarenergie (WBGU, 2003a). Sind diese Energieträger zukünftig ausreichend im Energiesystem verfügbar und das elektrische Leitungsnetz ausgebaut, haben Energiepflanzen als Energieträger weitgehend ihre Brückenfunktion in eine nachhaltige Energieversorgung erfüllt. Allerdings wird durch die erneuerba-

Tabelle 9.2-1
Synthese der Bewertung der Bioenergiepfade, jeweils aufgeschlüsselt nach Anbausysten, technischer Analyse und Treibhausgasbilanz. (a) Bewertung der Strom, Wärme- und KWK-Pfade; (b) Bewertung der Mobilitätspfade. Grau hinterlegte Nutzungspfade sind Reststoffpfade. * Bei Pfaden, die Grassilage/Gülle als Substrat haben, wurde angenommen, dass in Deutschland Grassilage keine Emissionen aus Landnutzungsänderungen verursacht, was aber global nicht übertragbar ist. Die Bezeichnung der Pfade bezieht sich auf die in den Tabellen 7.2-1 und 7.2-2 aufgelisteten Anbausysteme und Konversionsverfahren.
Quelle: WBGU basierend auf den Daten von Fritsche und Wiegmann, 2008 sowie Müller-Langer et al., 2008

	7.1 Anbausysteme Gesamtbewertung	**7.2 Technische Analyse** Energetischer Wirkungsgrad [%]	**7.3 THG-Bilanzen** THG-Minderungen mit iLUC pro Rohstoff Biomasse in t CO_2-eq/TJ
	possitiv	über 30	über 60
	nicht eindeutig	18–30	30 bis 60
Nutzungspfad	negativ	unter 18	unter 30
Rutenhirse-Pellet-Heizung-2030		17	17
KUP-Pellet-Heizung-2030		20	-1
Restholz-Pellet-Heizung-2005		19	61
Stroh-Pellet-Heizung 2005		15	46
Ölpalme(Regenwald)-Pflanzenöl-BHKW-2030		23	-185
Ölpalme(degradiert)-Pflanzenöl-BHKW-2005		23	190
Jatropha-Pflanzenöl-BHKW-2030		34	27
Jatropha(degradiert)-Pflanzenöl-BHKW-2030		34	176
Raps-Pflanzenöl-BHKW-2005		43	29
Maissilage-Biogas-BHKW-2005		33	37
Rutenhirse-Biogas-BHKW-2030		36	54
Grassilage/Gülle-Biogas-BHKW-2030*		30	107
Maissilage-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005		36	57
Rutenhirse-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2030		40	63
Grassilage/Gülle-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2030*		33	112
Maissilage-Biomethan-BHKW-2005		29	30
Rutenhirse-Biomethan-BHKW-2030		31	53
Grassilage/Gülle-Biomethan-BHKW-2030*		26	84
Maissilage-Biomethan-GuD-KW-2005		30	44
Rutenhirse-Biomethan-GuD-KW-2030		32	49
Grassilage/Gülle-Biomethan-GuD-KW-2030*		27	93
KUP-Biomethan-GuD-KW-2030		30	29
KUP-Rohgas-GasTurb-2030		28	9
KUP-Rohgas-BrennstZelle(SOFC)-2030		41	31
KUP-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2030		33	47
KUP-Pellet-KohleKW-2030		43	38
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BHKW-2005		24	113
BioAbfall-Biogas-BHKW-2005		29	88
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005		27	122
BioAbfall-Biogas-BrennstZelle(SOFC)-2005		32	91

Ernterückstände/Gülle-Biomethan-BHKW-2005		20	94
BioAbfall-Biomethan-BHKW-2005		26	80
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-GuD-KW-2030		21	103
BioAbfall-Biomethan-GuD-KW-2005		27	86
Restholz-Biomethan-GuD-KW-2030		30	100
Restholz-Rohgas-GasTurb-2030		29	86
Restholz-Rohgas-BrennstZelle(SOFC)-2030		41	109
Restholz-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2005		33	112
Stroh-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-2005		30	107
Restholz-Pellet-KohleKW-2005		38	101
Stroh-Pellet-KohleKW-2005		35	87
Ölpalme(Regenwald)-Biodiesel-PKW-2030		11	-257
Ölpalme(degradiert)-Biodiesel-PKW-2005		10	149
Jatropha-Biodiesel-PKW-2030		16	-13
Jatropha(degradiert)-Biodiesel-PKW-2030		16	63
KUP-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030		15	-13
Raps-Biodiesel-PKW-2005		23	-28
Raps-Pflanzenöl-PKW-2005		19	-56
Zuckerrohr-Ethanol-PKW-2005		8	-3
Zuckerrohr(degradiert)-Ethanol-PKW-2030		9	47
Maiskörner-Ethanol-PKW-2005		11	-10
Getreide-Ethanol-PKW-2005		11	-45
Maissilage-Biomethan-PKW-2005		9	-28
KUP-Biomethan-PKW-2030		20	-15
Grassilage/Gülle-Biomethan-PKW-2030*		15	53
Rutenhirse-Biogas-BHKW-elektroPKW-2030		30	40
Restholz-Hackschn-HeizKW-DampfTurb-elektroPKW-2030		31	116
Ernterückstände/Gülle-Biogas-BHKW-elektroPKW-2005		20	97
Restholz-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030		16	51
Stroh-Fischer-Tropsch-Diesel-BTL-PKW-2030		14	49
Altfett-Biodiesel-PKW-2005		25	80
Stroh-Ethanol-PKW-2030		11	32
Restholz-Biomethan-PKW-2030		20	63
Ernterückstände/Gülle-Biomethan-PKW-2005		9	36
BioAbfall-Biomethan-PKW-2005		13	34
Restholz-Wasserstoff-Brennstoffzelle(PEM)-PKW-2030		16	52

ren Energieträger meist direkt elektrische Energie erzeugt, deren Leistung starken zeitlichen Schwankungen unterliegt. Die biogenen Abfall- und Reststoffe sowie die Restnutzung fossiler Energieträger bekommen dann zunehmend die Aufgabe, diese Leistungsschwankungen auszugleichen (Regelenergie). Das vom Beirat identifizierte nachhaltige Biomassepotenzial kann perspektivisch zum Bedarf an Regelenergie und damit zur technischen Versorgungssicherheit und Stabilität der elektrischen Netze in einem nachhaltigen und integrierten Energieversorgungssystem mit hohen Anteilen von Wind- und Solarstrom signifikant beitragen. Durch Verwendung intelligenter Stromnetze kann auch die Elektromobilität einen Beitrag zur Regelenergie leisten (Kap. 8.1). Kombiniert man die Nutzung des nachhaltigen Bioenergiepotenzials mit der Abscheidung und sicheren Einlagerung von CO_2, so können sogar „negative CO_2-Emissionen“ erzeugt werden.

Zum anderen werden die Anforderungen an die globale Landnutzung in den nächsten Jahrzehnten durch dynamische Trends massiv steigen: eine wachsende Weltbevölkerung mit zunehmend flächenintensiven Ernährungsmustern, verstärkter Bodendegradation und Wasserknappheit. Zudem werden auch aus Klimaschutzgründen die petrochemischen Produkte künftig zunehmend aus Biomasse hergestellt werden. Dieser nicht substituierbare Landnutzungsbedarf für die Herstellung von Textilien, chemischen Produkten, Kunststoffen usw. dürfte bei rund 10 % der Weltagrarfläche liegen, wobei ein Teil der auf Biomasse basierenden Produkte nach ihrer Nutzung in Form von biogenem Abfall einer energetischen Verwertung zugeführt werden können („Kaskadennutzung"). Die Energiebereitstellung ist im Gegensatz dazu nicht an Kohlenstoff gebunden, sie kann auch direkt erzeugt werden. Dies alles vollzieht sich vor dem Hintergrund eines sich zunehmend manifestierenden anthropogenen Klimawandels. Daher wird vermutlich in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts der Energiepflanzenanbau wieder zurückgehen müssen. Der Sockel an Bioenergienutzung aus biogenen Reststoffen und Abfällen bleibt davon unberührt, da kaum Kopplung zur Landnutzung besteht, so dass ihr Beitrag zur Bereitstellung von Regelenergie in der Stromversorgung auch langfristig gesichert bleibt.

Globale Bioenergiepolitik 10

10.1 Einleitung

Aus Sicht des WBGU sollte sich die Bioenergiepolitik vor allem am Klimaschutz und an der Beseitigung der Energiearmut ausrichten (Kap. 2.2). Die Modellierung in Kapitel 6 zeigt, dass es global ein beachtliches nachhaltiges Potenzial für Bioenergie gibt. Die gegenwärtig weltweit zu beobachtenden Bioenergiestrategien sind jedoch nicht spezifisch auf die Ausnutzung dieses nachhaltigen Potenzials ausgerichtet, sondern fördern häufig auch nicht nachhaltige Bioenergieproduktion. Außerdem vernachlässigt der aktuelle Fokus auf Biokraftstoffe die Potenziale, die in der Effizienzsteigerung der global vergleichsweise relevanteren traditionellen Bioenergienutzung oder der Reststoff- bzw. Abfallnutzung liegen.

Ein sinnvoller Beitrag der Bioenergie zur Transformation der Energiesysteme in Richtung Nachhaltigkeit muss sich an entsprechenden Leitplanken ausrichten (Kap. 3). Dafür sind keineswegs alle Nutzungspfade von Bioenergie geeignet (Kap. 5 und 7). Es ist daher Aufgabe der Politik, Rahmenbedingungen zu schaffen, um die Bioenergienutzung in nachhaltige Bahnen zu lenken. Der WBGU empfiehlt Mindeststandards, die eine Voraussetzung für die Nutzung sämtlicher Bioenergieprodukte sein sollte. Da diese Mindeststandards nur eine eingeschränkte Gültigkeit erlangen können, sollte die nicht-nachhaltige Bioenergienutzung langfristig durch ein umfassendes und effektives Regulierungssystem, z.B. durch ein verändertes Anreizsystem im Rahmen der UNFCCC oder verbesserte Schutzregime im Rahmen der CBD, weltweit eingeschränkt werden. Nur solche Anwendungen, die positive ökologische und sozioökonomische Wirkungen aufweisen, die effizientere Nutzung traditioneller Biomasse befördern und auf Rest- und Abfallnutzung basieren sollten gefördert werden (Förderstandards).

Es kommt also darauf an, einen Regulierungsrahmen zu entwerfen, der die Bedingungen so setzt, dass möglichst viele der Chancen genutzt und die Risiken vermieden werden. Die Schwierigkeiten der Regulierung bestehen jedoch auf mehreren Ebenen: Zuallererst ist Bioenergie ein Querschnittsthema, das eine Vielzahl von Politikbereichen und Interessenslagen berührt. „Bioenergiepolitik“ umfasst nicht nur Energie- Landwirtschafts- und Klimapolitik, vielmehr spielen auch Verkehrspolitik Außenwirtschaftspolitik, Umweltpolitik sowie die Entwicklungs- und Sicherheitspolitik in sich das konstituierende Politikfeld hinein. Hinzu kommt die komplexe Dynamik von Märkten. Energie- und Agrarmärkte werden über Bioenergie immer enger gekoppelt und gerade Energiemärkte sind stark durch strategische Interessen von Staaten geprägt. Hier sind also komplexe politische Gestaltungsaufgaben zu bewältigen, die über die Grenzen etablierter Politikarenen hinausreichen, so dass Akteure zusammenwirken müssen, die in der Vergangenheit nur wenig Berührungspunkte hatten. Für die überwiegend sektoral organisierte Politik stellt dies große Anforderungen an die Steuerungs- und Integrationsfähigkeit. Bioenergiepolitik sprengt aber auch den Rahmen eines in Nationalstaaten organisierten internationalen Systems. Da eine Beimischungsquote für Biokraftstoffe in Europa zur Entwaldung in anderen Teilen der Welt führen kann, ist Bioenergie beispielhaft für ein komplexes globales Problem, bei dem Handlungen staatlicher und nichtstaatlicher Akteure auf lokaler oder nationaler Ebene ungewollte Konsequenzen überregionaler bzw. globaler Art verursachen. Bioenergiepolitik macht daher auch eine Mehrebenenpolitik notwendig. Erschwerend kommt hinzu, dass politische Entscheidungsträger unter großer Unsicherheit handeln müssen, weil wissenschaftliche Grundlagen und Zusammenhänge noch unzureichend erforscht sind. Schließlich geht es bei Bioenergie auch um Aspekte globaler Verteilungsgerechtigkeit, worauf mit dem Schlagwort „Teller oder Tank“ zwar verkürzt, aber doch prägnant hingewiesen wird. Es handelt sich also um ein ökonomisch, technisch-naturwissenschaftlich, ökologisch sowie sozial brisantes Politikfeld, das die lokale, regionale und globale Ebene umspannt, und in dem angesichts der großen Dynamik der Entwicklung schnell politische Entscheidungen getroffen und verantwortet werden müssen. Kurz: „Biofuels, while

seemingly simple, are incredibly hard to do right" (Greene zitiert in Conniff, 2007).

Weil der Anbau von Energiepflanzen in schnellem Tempo vorangeht, kommt es jetzt darauf an, Instrumente zu entwickeln und Maßnahmen zu ergreifen, die kurz- und langfristig nachhaltige Entwicklungen befördern. Derzeit gibt es weder eine internationale Organisation noch ein Vertragswerk, das spezifisch für das Thema Bioenergie zuständig wäre. Stattdessen haben sich in den letzten Jahren auf nationaler, regionaler und multilateraler Ebene eine Vielzahl an privaten Foren, UN-Aktivitäten und zwischenstaatlichen Prozessen entwickelt, die das Thema Bioenergie mit unterschiedlichen Partnern und in unterschiedlicher Zielrichtung aufgreifen. Insgesamt zeigt sich ein fragmentiertes und weiterhin von Unklarheit geprägtes institutionelles Bild, wenn auch mittlerweile verstärkte Anstrengungen unternommen werden, eine Kohärenz zwischen den einzelnen Initiativen und Prozessen herzustellen. Das Ringen um praktikable und verbindliche Standards, um bestmögliche Förderstrategien und institutionelle Neuregelungen bzw. geeignete Nutzung bestehender Steuerungsmöglichkeiten hält an. Der WBGU möchte in dieser Diskussion vor dem Hintergrund der vorangegangenen Analysen und bestehenden Regulierungsbemühungen einen gangbaren Weg für die Weiterentwicklung einer zukünftigen nachhaltigen globalen Bioenergiepolitik aufzeigen. Der Aufbau der folgenden Kapitel gibt die Logik dieser neuen Politik wieder.

Um sicherzustellen, dass der Ausbau der Bioenergienutzung einen Beitrag zum Klimaschutz leistet, müssen die Rahmenbedingungen stimmen. Kapitel 10.2 beschäftigt sich daher mit den Anreizen und Verpflichtungen im Rahmen des UN-Klimaschutzregimes. Da eine Anpassung der Regelungen und Anrechungsmodalitäten keine kurzfristige Wirkung entfaltet und die Einhaltung weiterer Nachhaltigkeitsdimensionen (z.B. Ernährungssicherung oder Erhaltung biologischer Vielfalt) nicht sicher stellen kann, müssen **g**leichzeitig die Prozesse zur Erarbeitung von Bioenergiestandards gebündelt und vorangetrieben werden. Die Frage der Standardsetzung und Initiativen zu weitergehenden Instrumenten für ein globales Land- und Flächenmanagement für alle Arten der Biomasse- bzw. Landnutzung werden daher in Kapitel 10.3 behandelt. Das Ziel einer nachhaltigen Bioenergienutzung und einer Verminderung der Flächennutzungskonkurrenzen ist jedoch auch durch entsprechende Standards allein nicht erreichbar. Dafür sind weitergehende flankierende Maßnahmen zur Sicherung der globalen Nahrungsmittelproduktion und der biologischen Vielfalt sowie des Wasser- und Bodenschutzes erforderlich. Dazu können bestehende UN-Institutionen einen wichtigen Beitrag leisten. Kapitel 10.4 beschreibt entsprechende Initiativen und die Rolle der FAO zum Schutz der Welternährung. Kapitel 10.5 widmet sich den Möglichkeiten der CBD für eine verbesserte Erhaltung der biologischen Vielfalt, und in Kapitel 10.6 werden Maßnahmen zum Wasser- und Bodenschutz benannt. Welche Nutzungsformen der Bioenergie explizit gefördert werden sollen und wie dann eine nationale und internationale Förderpolitik aussehen könnte, die sich konsequent an den Zielen Klimaschutz und Überwindung der Energiearmut ausrichtet, zeigen die Kapitel zu staatlichen Förderpolitiken (Kap. 10.7) und zur Entwicklungszusammenarbeit (Kap. 10.8).

10.2 Internationale Klimapolitik

10.2.1 Die UNFCCC als Akteurin globaler Bioenergiepolitik

Wie in Kapitel 2 dargelegt, ist Klimaschutz gegenwärtig nicht der einzige Grund für das zunehmende Interesse an der Bioenergienutzung. Somit können der globale Klimaschutz und entsprechend die UNFCCC sicherlich nicht als *die* Treiber der zunehmenden Bioenergienutzung betrachtet werden. Auch sind die bioenergiepolitischen Steuerungsmöglichkeiten der UNFCCC per se begrenzt, da neben dem Klimaschutz andere Zielvorstellungen bei der Nutzung von Bioenergie eine gewichtige Rolle spielen. Ihre auf die Klimapolitik fokussierten Steuerungsmöglichkeiten sollte die UNFCCC gleichwohl ausschöpfen. Eine Mindestanforderung an das internationale Klimaschutzregime wäre, dass von seinen Regelungen keinesfalls Anreize zu einer unter Klimaschutzaspekten kontraproduktiven Bioenergiepolitik ausgehen sollten. Idealerweise jedoch sollte die internationale Klimaschutzpolitik derart gestaltet sein, dass die Bioenergienutzung in vollem Einklang mit den Erfordernissen zur Abwehr eines gefährlichen Klimawandels steht (Kap. 3). Das bedeutet auch, dass Aktivitäten im Bereich der Bioenergie integriert betrachtet werden, d.h. dass ihre Implikationen für die Treibhausgasemissionen im Energiesektor und im Landnutzungssektor zusammen gesehen werden müssen. Bioenergienutzung betrifft stets beide Bereiche, weswegen eine isolierte Betrachtung der Sektoren nicht angebracht erscheint.

Dabei geht es aus Sicht des WBGU vor allem um zwei zentrale Anforderungen:

Erstens ist die UNFCCC die wichtigste globale Referenzinstitution für Daten über Emissionen und Emissionsminderungen. Diese nach Ländern und Sektoren untergliederten Daten dienen außer zur

Beurteilung der jeweiligen Beiträge zu den globalen Emissionen letztlich auch zur Bewertung der Klimaschutzpolitik der einzelnen Staaten. Daher ist es umso wichtiger, dass die im Zuge der Bioenergienutzung emittierten Treibhausgase derart erfasst werden, dass sich hierin der tatsächliche Beitrag zum Klimaschutz unverfälscht widerspiegelt. Gleiches gilt für die Verfahren des Kioto-Protokolls, mittels derer Emissionen den Ländern mit Emissionsobergrenzen angerechnet werden.

Zweitens ist zu erwarten, dass mit zunehmend ambitionierten Reduktionszielen die Steuerungswirkung der UNFCCC bzw. des Kioto-Protokolls und seiner Nachfolgeregime auf die Bioenergienutzung zunimmt. Die direkten oder indirekten Anreize, die innerhalb des Regimes für die Nutzung von Bioenergie gesetzt werden, sollten so abgestimmt sein, dass sie zu einer möglichst hohen globalen Emissionsminderung beitragen. Das gilt für die flexiblen Mechanismen im Allgemeinen und den Clean Development Mechanismus (CDM) im Besonderen.

Darüber hinaus sollte beachtet werden, dass die durch die UNFCCC entfaltete Steuerungswirkung für die Bioenergienutzung andere Nachhaltigkeitsanforderungen nicht konterkariert (Kap. 3).

Im Folgenden werden die Wirkungen bestehender Regelungen auf den Bereich der Bioenergie untersucht, aktuelle Verhandlungsprozesse dargestellt und bewertet sowie auf dieser Grundlage erörtert, welche Weiterentwicklung der Regelungen im Rahmen der UNFCCC notwendig erscheint, um vollständige Kompatibilität zwischen Bioenergienutzung und Klimaschutz herzustellen.

10.2.2 Bewertung, Zuordnung und Anrechnung von Emissionen

10.2.2.1 Bestehende Regelungen und damit verbundene Probleme

Die Vertragsstaaten der UNFCCC sind dazu verpflichtet, Inventare zu nationalen Treibhausgasemissionen gemäß den IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006) zu erstellen, zu veröffentlichen und regelmäßig fortzuschreiben. Diese Inventare bilden die zentrale Datengrundlage für die globale Erfassung anthropogener Emissionen. Von der Inventarisierung abzugrenzen ist die *Anrechnung* von Emissionen im Rahmen des Kioto-Protokolls – diese betrifft einerseits nur die Staaten, die sich zu Emissionsobergrenzen verpflichtet haben (Annex-I-Staaten), andererseits kommt hier auch nur ein Teil der inventarisierten Emissionen zur Anrechnung.

Inventare: Kohlenstoffneutralität und Zuordnung von Emissionen

Nach derzeitigen Richtlinien des IPCC gilt die Nutzung von Biomasse zur Energieerzeugung oder im Verkehr grundsätzlich als *kohlenstoffneutral*, d.h. in den Inventaren werden zwar die bei der Bioenergienutzung entstehenden Treibhausgase CH_4 und N_2O gezählt, die entstehenden CO_2-Emissionen werden jedoch im Energiesektor mit Null angesetzt (IPCC, 2006). Für Biomasse mit kurzer Lebensdauer (etwa jährliche Energiepflanzen) wird diese Handhabung damit begründet, dass der freigesetzte Kohlenstoff in naher Vergangenheit durch Photosynthese von der Pflanze gebunden und damit der Atmosphäre entzogen wurde. Damit werden zwei Prozesse, die räumlich und zeitlich auseinander liegen können, zu Null addiert (Abb. 10.2.1). Bei der energetischen Nutzung von Holz wird im Energiesektor die CO_2-Emission ebenfalls mit Null angesetzt. Allerdings wird im Gegenzug direkt bei der Ernte von Holz eine CO_2-Emission berechnet – man betrachtet also die Holzernte, als würde hierbei der im Holz gespeicherte Kohlenstoff unmittelbar an die Atmosphäre abgegeben (Abb. 10.2.1B). Eine mögliche stoffliche Nutzung der Holzprodukte, die den enthaltenen Kohlenstoff unter Umständen für Jahrzehnte binden würde (Kap. 5.3 und 5.5), wird somit nicht berücksichtigt. Während die Länder für die Inventare innerhalb der Klimarahmenkonvention auch auf alternative Berechnungsmethoden zurückgreifen können („Harvested Wood Products“: Kasten 10.2-1), sind sie für die Anrechung unter dem Kioto-Protokoll an diese Methode gebunden.

Unvollständige Anrechnung in Annex-I-Staaten

Aus der oben beschriebenen Zuordnung der Emissionen ergeben sich bestimmte Konsequenzen für Anrechnung von Bioenergienutzung im Rahmen des Kioto-Protokolls. Während sich Annex-I-Staaten die den Energie-, Industrie-, Abfall- und Landwirtschaftssektoren zugeordneten Emissionen grundsätzlich anrechnen lassen müssen, ist dies im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) nur zum Teil der Fall. Nach Art. 3.3 des Kioto-Protokolls müssen nur die Veränderungen der Kohlenstoffvorräte infolge von Aufforstung, Wiederaufforstung und Entwaldung seit 1990 zwingend einbezogen werden. Darüber hinaus sind in Art. 3.4 weitere Aktivitäten aufgelistet, deren Einbeziehung optional ist. Diese umfassen die Änderung von Quellen oder Senken in Folge von Ödlandbegrünung sowie Bewirtschaftung von Fors-

Tabelle 10.2-1
Bisherige Praxis der Inventare und Anrechnungen in der ersten Verpflichtungsperiode des Kioto-Protokolls bezogen auf die Treibhausgas-Bilanzkette bei der Bioenergienutzung. A: kurzlebige Biomasse (Bioenergiepflanzen). B: Holz. Die Spalten stellen die unterschiedlichen „Verarbeitungsschritte" bei der Bioenergienutzung dar. Dabei können diese Schritte sowohl zeitlich als auch räumlich voneinander getrennt auftreten. Insbesondere können auch Teile dieser Kette in Nicht-Annex-I-Staaten durchgeführt werden, und Teile in Annex-I-Staaten. Für Schritte, die in Nicht-Annex-I-Staaten erfolgen, werden weder Emissionen noch CO_2-Aufnahmen angerechnet. Die Farben beschreiben jeweils, ob und in welchem Sektor die Emissionen in Annex-I-Staaten angerechnet werden. Das Schema für Holz orientiert sich an der vorgeschriebenen Anrechnung im Kioto-Protokoll (Kap. 10.2.2.2).
Quelle: WBGU

A: Schema für Bioenergiepflanzen	**Landnutzungs-änderung (direkte Konversion und indirekte Effekte)**	**Anbau (Landwirtschaft)**	**Verarbeitung/ Transport**	**Nutzung/ (Verbrennung)**
Quellen	CO_2 (bio)	CO_2 (bio): Kohlen-stoffspeicher im Boden nimmt ab	CO_2 (bio)	CO_2 (bio)
		CO_2 (fossil): (Maschineneinsatz)	CO_2 (fossil)	
		N_2O, CH4		N_2O und CH_4
Senken		CO_2-Aufnahme der Pflanze		
	CO_2-Aufnahme (z. B. Erhöhung des Kohlenstoffspeichers im Boden)	CO_2-Aufnahme (Erhöhung des Koh-lenstoffspeichers im Boden)		
B: Schema für Holz		**Anbau und Ernte (Forstwirtschaft)**	**Verarbeitung/ Transport**	**Nutzung/ (Verbrennung)**
Quellen		CO_2 (bio): Kohlen-stoffspeicher nimmt ab (Holzernte wird als Emission gezählt)	CO_2 (bio)	CO_2 (bio)
		CO_2 (fossil): (Maschineneinsatz)	CO_2 (fossil)	
				N_2O und CH_4
Senken		CO_2-Aufnahme (Erhö-hung des Kohlenstoff-speichers im Wald)		

- Wird in den Inventaren automatisch zu Null addiert und somit nirgendwo angerechnet
- Wird in den Inventaren mit Null angesetzt, keine Anrechnung im Energiesektor
- Energiesektor: Wird in Annex-I-Staaten angerechnet
- Landwirtschaftssektor: Wird in Annex-I-Staaten angerechnet
- LULUCF-Sektor: Wird in Annex-I-Staaten nur verpflichtend angerechnet, wenn es sich um Entwaldung/Aufforstung handelt. Sonst optional (unter 3.4)
- LULUCF-Sektor: Kann in Annex-I-Staaten angerechnet werden, wenn sich diese dafür entscheiden (Art. 3.4)

ten, Äckern und Weiden. Jeder Annex-I-Staat muss vor Beginn der Verpflichtungsperiode festlegen, ob und welche der oben genannten Aktivitäten in Anrechnung kommen sollen (UBA, 2003b). Da die CO_2-Emissionen aus der Landnutzung unter Art. 3.4 fallen, müssen in der Praxis im Landwirtschaftsbereich nur die nicht-CO_2-Emissionen zwingend angerechnet werden (Benndorf, persönliche Mitteilung). Bei der Ernte von Holz gibt es keine zentrale Regelung, wann genau es sich um Entwaldung handelt, die dann unter Art. 3.3 zwingend anzurechnen wäre, oder wann es sich um Forstbewirtschaftung handelt, die nur anzurechnen ist, wenn sich ein Land für diese Aktivität unter Art. 3.4 entschieden hat. Jedes Land muss hier jedoch eine klare Regelung vorschlagen (Höhne et al., 2007).

In der Summe führen diese Regelungen und ihr Nebeneinander dazu, dass in Annex-I-Staaten nicht zwingend alle Emissionen, die durch Anbau und Ernte von Bioenergie bzw. durch mit dem Anbau verbundene direkte oder indirekte Landnutzungsänderungen entstehen, angerechnet werden (Abb. 10.2-1). Gleichzeitig wird aber das während der energetischen Nutzung freigesetzte CO_2 mit Null angesetzt, die Substitution anderer Emissionen durch Bioenergienutzung kann also als vollständig vermiedene Emission angerechnet werden. Es ist daher davon auszugehen, dass die durch den Einsatz von Bioenergie anrechenbare Emissionsreduktion meist größer ausfällt als die tatsächlich erzielte Reduktion.

Fehlende Anreize

Die grundsätzliche Nullanrechnung von CO_2-Emissionen bei der Bioenergienutzung führt weiterhin dazu, dass verschiedene Aktivitäten, die zu einer realen Emissionsreduktion beitragen würden, nicht angerechnet werden können. Als erstes ist hier die stoffliche Nutzung von Holzprodukten zu nennen (Kasten 10.2-1 „Harvested Wood Products"). Da der im Holz enthaltene Kohlenstoff bereits bei der Ernte als emittiert gilt, wird eine verzögerte CO_2-Freisetzung durch eine langfristige Nutzung der Holzprodukte unter den bestehenden Regelungen nicht honoriert, obwohl sie aus Klimaschutzgründen wünschenswert wäre (Kap. 5.3 und 5.5). Ein weiteres Beispiel ist die Abtrennung und Speicherung von CO_2 bei der Erzeugung von Energie aus Biomasse. Eine solche Technologie würde die Möglichkeit bieten, der Atmosphäre CO_2 netto zu entziehen (Kap. 6; Kasten 6.8-1). Da das CO_2 aber auch ohne Speicherung bei der Anrechnung so behandelt wird, als wäre es gar nicht emittiert worden, gehen vom gegenwärtigen Anrechnungsverfahren in der ersten Verpflichtungsperiode des Kioto-Protokolls keinerlei Anreize zur Sequestrierung von biogenem CO_2 aus (Grönkvist et al., 2006).

Handel mit Biomasse für die energetische Nutzung

Wird Bioenergie in einem Nicht-Annex-I-Staat produziert und anschließend in einem Annex-I-Staat genutzt, wird das Problem der unvollständigen Anrechnung verschärft. In diesem Fall werden die bei der Produktion anfallenden Emissionen innerhalb des Kioto-Regimes überhaupt nicht angerechnet, so dass die anrechenbare Emissionsreduktion fast immer größer ausfällt als die tatsächlich erzielte Reduktion. Insbesondere die Umwandlung tropischer Wälder in Bioenergieplantagen kann zu sehr hohen Emissionen führen und damit zu einer negativen Bilanz der Bioenergienutzung (Kap. 7.3). Ohne zusätzliche Maßnahmen könnte daher selbst eine Nutzung von Bioenergie, die netto zu einer Steigerung der Emissionen führt, von einem Annex-I-Staat als Emissionsminderung verbucht werden. Das gegenwärtige Anrechnungssystem unterstützt damit den Import von Bioenergie aus Entwicklungsländern unabhängig davon, ob Emissionen damit vermieden, nur verlagert oder sogar gesteigert werden.

Mögliche Konflikte zwischen Bioenergienutzung und anderen Klimaschutzmassnahmen im Landnutzungsbereich

Die oben beschriebenen Zusammenhänge zeigen, dass die direkten und indirekten Anreize innerhalb der Klimarahmenkonvention die Bioenergienutzung in für den Klimaschutz ungünstige Bahnen lenken kann. Darüber hinaus ist mit weiteren indirekten Effekten durch eine verstärkte Bioenergienutzung zu rechnen, die andere Klimaschutzbemühungen gefährden (Kap. 5.5). Hier ist besonders die Entwaldung in Entwicklungsländern zu nennen, die gegenwärtig mehr als 20 % der globalen anthropogenen CO_2-Emissionen ausmacht (IPCC, 2007c), aber auch die Umwandlung von Grasland für den Anbau von Energiepflanzen (Kap. 4.2.3.3). Selbst wenn hierfür nicht direkt Waldfläche gerodet oder Grasland umgebrochen wird, dürfte die mittelbare Umwandlung solcher Flächen zunehmen, da die Produktion von Energiepflanzen andere Nutzungen von Flächen verdrängt, so dass nun der Anbau von anderen Nutzpflanzen oder die Weidelandnutzung für die Viehwirtschaft auf bislang relativ unberührtes oder weniger intensiv/extensiv genutztes Land ausweicht (Searchinger et al., 2008; Kap. 5.5). Gegenwärtig bietet die Klimarahmenkonvention Entwicklungsländern keine unmittelbaren Anreize, die Konversion von Wald- oder Grasflächen in Ackerland zu reduzieren. Der sich abzeichnende Bioenergieboom macht es somit noch dringlicher, dass im Rahmen der UNFCCC bzw. der (Post-)Kioto-Mechanismen alle LULUCF-Emissionen angerechnet und hinreichend Anreize für Entwicklungsländer implementiert werden, die terrestrischen Kohlenstoffvorräte zu schützen und der Entwaldung entgegenzuwirken.

10.2.2.2 Kriterien und Möglichkeiten für die Weiterentwicklung der Regelungen

Aus den dargestellten Problemen ergibt sich die Notwendigkeit, die Bioenergieproduktion und –nutzung dringend auf die Tagesordnung der UNFCCC-Gremien zu setzen, die Anrechnungsmodalitäten für die Verpflichtungen im Rahmen des Kioto-Protokolls zu

Kasten 10.2-1

„Harvested Wood Products“

In einem „Technical Paper“, das das UNFCCC-Sekretariat im Jahr 2003 verfasst hat, werden die Möglichkeiten der Anrechnung von Emissionen aus der Nutzung von Holzprodukten erörtert. Die diskutierten Nutzungen schließen explizit auch die Nutzung von Holz als Brennstoff ein. Es werden folgende alternative Anrechnungsmethoden vorgestellt:

1. IPCC default method
Bei dieser gegenwärtig praktizierten Methode wird angenommen, dass die jeweils vorhandene Menge an Holzprodukten konstant bleibt. Es werden daher nur (positive oder negative) CO_2-Emissionen bei der Abholzung oder (Wieder-)Aufforstung von Wald gezählt. Die Emissionen aus der Abholzung (oder Ernte) werden im Jahr der Abholzung dem Land zugerechnet, in dem sie erfolgt. In den Treibhausgasinventaren wird die Abholzung/Ernte also als unmittelbare Emission behandelt, unabhängig davon, ob die entstehenden Produkte (Holz) zunächst noch gelagert, exportiert o.ä. werden. Um eine doppelte Zählung zu vermeiden, werden deshalb CO_2-Emissionen, die aus der Verbrennung von Holzprodukten entstehen (energetische Nutzung, Abfall) grundsätzlich nicht als Emission gezählt. Dies hat insbesondere Auswirkungen, wenn Holzprodukte aus einem Land ohne Kioto-Verpflichtungen für die energetische Nutzung in ein Land mit Verpflichtungen exportiert werden. Diese Methode bietet besonders hohe Anreize, Holz zur Energieerzeugung zu verwenden, da das Holz bei der Ernte als Emission gezählt wird (wogegen es in einem Land ohne Verpflichtungen keinen Anreiz gibt), während das importierende Land so eine gemäß den Kioto-Regelungen (aber nicht in der realen Welt) emissionsfreie Energiequelle erhält.

2. Stock Change approach
Eine Alternative zur von der UNFCCC beschriebenen default Methode ist der Stock Change approach: Hierbei werden sowohl Änderungen des Forstbestandes als auch des Bestandes an Holzprodukten gezählt, wobei erstere dem Land zugerechnet werden, in dem sich der Wald befindet („produzierendes Land“), letztere dem Land, in dem die Holzprodukte konsumiert werden („konsumierendes Land“). Die mit den Änderungen verbundenen Emissionen werden dann jeweils dem Land zugerechnet, in dem sie erfolgen, und zwar zu dem Zeitpunkt, zu dem sie erfolgen. Gegenüber dem IPCC default approach erscheint hier die energetische Nutzung weniger attraktiv. Beispielsweise kann ein Land mit Kioto-Verpflichtungen Holzprodukte importieren und sich dies als CO_2-Senke anrechnen lassen. Erst bei der energetischen Nutzung oder dem Zerfall als Abfall („decay“) wird ihm das entstehende CO_2 wieder als Emission angerechnet.

3. Production approach
Hierbei werden wie beim Stock change approach sowohl Änderungen des Forstbestandes als auch des Bestandes an Holzprodukten jeweils zum Zeitpunkt ihres Auftretens gezählt, jedoch beide dem produzierenden Land zugerechnet. Dieser Ansatz unterscheidet sich von der IPCC default method nur durch den Zeitpunkt der Anrechnung der Emissionen aus der Nutzung von Holzprodukten. Bei dieser Zählmethode ist (wie bei der IPCC default method) der Anreiz für verpflichtete Länder besonders hoch, importierte Biomasse energetisch zu nutzen, da die entstehenden Emissionen ihnen nicht zugerechnet werden. Das exportierende Land sollte dagegen mehr an dem Export für langlebige Produkte interessiert sein, da ihm in diesem Fall die Emissionen erst später zugerechnet werden.

4. Atmospheric Flow approach
Bei diesem Ansatz werden die Emissionen an dem Ort und zu dem Zeitpunkt gezählt, an dem das CO_2 in die Atmosphäre gelangt. Dem produzierenden Land werden dann nur die direkten Emissionen, die bei der Ernte in die Atmosphäre gelangen, zugerechnet. Die bei der Nutzung oder dem Zerfall von Holzprodukten entstehenden Emissionen werden dem konsumierenden Land zugerechnet. In diesem Fall würde importierte Biomasse zur energetischen Nutzung für das konsumierende Land genau wie die Nutzung fossiler Energieträger angerechnet und könnte daher nicht zur Reduktion von Emissionen verwendet werden, wodurch der Anreiz zur Bioenergienutzung in verpflichteten Ländern entfiele. Allerdings generiert dieses Verfahren in der von der UNFCCC beschriebenen Form Anreize für einen ebenfalls klimaschutzpolitisch fragwürdigen Export von Bioenergieträgern in Entwicklungsländer: Ein verpflichtetes Land könnte sich den Aufwuchs eines Waldes als Senke anrechnen lassen, das geerntete Holz in ein nicht verpflichtetes Land exportieren, das die Emissionen mangels Verpflichtungen nicht kompensieren muss. Der WBGU macht dazu einen modifizierten Vorschlag, der den Handel zwischen verpflichteten und nicht verpflichteten Ländern betrifft (Kap. 10.2.2.2).

reformieren und die Zuordnung der Emissionen in den Treibhausgasinventaren anzupassen.

„Cap and trade for all countries and all emissions “

Viele der beschriebenen Probleme ließen sich theoretisch elegant beheben, indem Emissionsobergrenzen für alle Länder, Sektoren und Emissionen einschließlich LULUCF vereinbart würden. Kommt es zu einem „*cap and trade for all countries and emissions (and sectors)*“, würde der Anreiz zur Emissionsminderung auf einem globalen Kohlenstoffmarkt über den Preis für Emissionsrechte erfolgen. Soweit alle Emissionen weitestgehend zeitpunktgetreu angerechnet werden, wäre ein solcher Ansatz effektiv und idealerweise zugleich volkswirtschaftlich effizient, und zwar zunächst unabhängig davon, welchem Akteur die Emissionen jeweils angerechnet würden. Allerdings ist auf absehbare Zeit nicht zu erwarten, dass Entwicklungs- und Schwellenländer eigenen Emissionsobergrenzen zustimmen werden. Außerdem sind erhebliche praktische Probleme bei der Umsetzung einer reinen Marktlösung zu erwarten, besonders für den Bereich landnutzungsbedingter Emissionen (LULUCF). Wenngleich also Emissionsobergrenzen für alle Länder und alle Treibhausgasemissionen ein langfristig anzustrebendes Ziel der aktuellen Politik und Marktlösungen, soweit

praktikabel und zielwirksam, ein Leitbild für die Wahl der Instrument sein sollten, muss es zunächst darum gehen, Optionen für ein Übergangsregime zu finden. Dabei geht es außer um die Beseitigung der oben beschriebenen Schlupflöcher, anderer Defizite und der unzureichenden Behandlung von LULUCF auch darum, Anrechnungsverfahren zu finden, die es Entwicklungsländern erleichtern, Verpflichtungen bis hin zu Emissionsobergrenzen zu übernehmen.

„Von der Wiege bis zur Bahre"

Eine Möglichkeit, um Anreize zur Emissionsverlagerung durch den Import von Bioenergieträgern zu vermeiden, wäre in Anlehnung an verschiedene Zertifizierungsinitiativen, dem Endnutzer der Bioenergie die Emissionen aus der gesamten Produktionskette zuzurechnen (z.B. Emissionen der Landnutzungsänderung, des Anbaus, der Verarbeitung, des Transports und der Nutzung). Diese Methode birgt jedoch erhebliche Probleme: Da man dem Endprodukt, d.h. dem Bioenergieträger, seine Produktionskette nicht ansieht, muss jeweils eine lückenlose Buchführung vorliegen und eine Entscheidung über die Aufteilung von Emissionen auf Kuppelprodukte und die zeitliche Zuordnung von Landnutzungsemissionen getroffen werden. Um Doppelzählungen und doppelte Anrechnungen zu vermeiden, müssten die dem Endprodukt zugeordneten Emissionen in den Inventaren den ursprünglichen Sektoren abgezogen werden – d.h. etwa müssten die durch den Maschineneinsatz bei der Produktion der Biomasse entstehenden Emissionen im Energiesektor abgezogen werden. Dies würde nicht nur erheblichen Bürokratie- und Kontrollaufwand verursachen, sondern würde letztlich eine vollständige Umstrukturierung der Inventare erfordern, bei denen bisher aus gutem Grund die Emissionen grundsätzlich dem Staat, auf dessen Territorium sie erfolgen und der sie damit am ehesten kontrollieren kann, und dem Zeitpunkt, zu dem sie erfolgen, zugerechnet werden. Hinzu käme, dass sich schwerlich begründen lässt, warum dieses Prinzip dann nicht auch bei anderen Produkten durchbrochen werden sollte und bei Kuppelprodukten geradezu müsste. Öffnet man diese Büchse der Pandora, wären die Inventarisierungs- und Anrechnungsverfahren schließlich nicht mehr handhabbar.

Zuordnung der Emissionen: Der Atmospheric Flow-Ansatz

Der WBGU vertritt die Auffassung, dass entstehende Emissionen grundsätzlich dem Staat zuzuordnen sind, auf dessen Territorium sie entstehen, und plädiert dafür, die Ausnahmeregelung für Bioenergie abzuschaffen. Auch die Anrechnung von Emissionen bei der Nutzung von Holz und Holzprodukten sollte sich daran orientieren, wo und zu welchem Zeitpunkt reale Emissionen entstehen. Dazu erscheint das Schema „Atmospheric Flow" (Kasten 10.2-1) weitgehend geeignet und sollte auf die Bioenergieproduktion im Allgemeinen ausgedehnt werden. Damit würden bei der Ernte jeweils nur die unmittelbar entstehenden CO_2-Emissionen gezählt, und entsprechend bei der Nutzung der Ernteprodukte die jeweils dabei entstehenden CO_2-Emissionen. Diese Emissionen lassen sich allerdings nur zum Teil zuverlässig erfassen, etwa bei Bioenergie, Müllverbrennung, Deponiegas, Gebäudebränden und dem natürlichen Verrotten von Baumaterialien aus Holz (UNFCCC, 2003). Daher wäre möglicherweise eine kombinierte Regelung sinnvoll: Ernteprodukte, die einen handelbaren Energieträger darstellen oder in einen solchen umgewandelt wurden (Holz für die energetische Nutzung, Biokraftstoffe), werden nach dem „Atmospheric Flow"-Ansatz behandelt, da die Nutzung und damit die CO_2-Emission zu einem definierten Zeitpunkt erfolgt und gut messbar ist bzw. ohnehin bereits in den Inventaren ausgewiesen wenn auch mit Null berechnet wird. Damit können insbesondere Anreize geschaffen werden, bei der Bioenergienutzung verstärkt auf technische Effizienz zu achten, anstatt Effizienz durch Bioenergienutzung zu ersetzen. Emissionen aus Holz für die stoffliche Nutzung würden hingegen mit Hilfe einer hypothetischen jährlichen Emissionsrate gezählt, die sich an einer vorab festgelegten länderspezifischen Lebensdauer orientiert. Während hierfür zunächst von einer pauschalen und recht niedrigen Lebensdauer ausgegangen werden sollte, sollten die Länder die Möglichkeit erhalten, diesen Zeitraum bei entsprechenden Nachweisen zu verlängern. Für die übrigen Ernteprodukte (Nahrungsmittel, Reststoffe) sollte weiterhin der „default approach" angewendet werden, da hier von einer sehr kurzen Lebensdauer auszugehen ist. Damit die Konsistenz gewährleistet ist, müssen den realen Quellen auch reale Senken gegenüberstehen. Bei Holzprodukten ist dies bereits in dem Sinne gewährleistet, dass die Zunahme des Kohlenstoffspeichers beim Aufwuchs des Waldes als Senke, d.h. Kohlenstoffaufnahme, gezählt wird. Um das „Atmospheric flow"-Schema auf andere biogene Energieträger zu übertragen, sollte auch hier die Kohlenstoffaufnahme beim Aufwuchs als CO_2-Senke gezählt werden.

Vollständige Erfassung der Emissionen aus Landnutzung und Landnutzungsänderungen in Annex-I-Staaten und Handel zwischen Annex-I-Staaten

Auch mit einer Zuordnung der Emissionen nach dem „Atmospheric Flow"-Ansatz ist das Problem der unvollständigen Anrechnung in Annex-I-Staa-

ten noch nicht gelöst. Es sollten daher zusätzlich zu den bisher anzurechnenden Sektoren auch die bei Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft entstehenden Emissionen in Annex-I-Staaten vollständig und zwingend auf die Emissionsobergrenzen (oder gegebenenfalls Obergrenzen im LULUCF-Sektor) angerechnet werden. Dies erfordert eine verpflichtende Anrechnung der bisher in Art. 3.3 und Art. 3.4 des KP geregelten Aktivitäten und ihre Ausweitung auf alle anthropogenen Emissionen im LULUCF-Sektor.

Eine solche Regelung, bei der der „Atmospheric Flow"-Ansatz mit der vollständigen Erfassung der anthropogenen Treibhausgasflüsse im LULUCF-Sektor kombiniert wird, bietet für Annex-I-Staaten Anreize, die Nutzung fossiler Energieträger durch im eigenen Land angebaute Biomasse zu ersetzen, sofern die Gesamtbilanz zu einer Emissionsminderung führt. Sie bietet jedoch keinen unmittelbaren Anreiz zur Nutzung importierter Biomasse zur Energieerzeugung, denn die energetische Nutzung importierter Biomasse wäre damit der Nutzung fossiler Energieträger gleichgestellt.

Anrechnung beim Handel zwischen Annex-I-Staaten und Nicht-Annex-I-Staaten

Die beschriebenen Anrechnungsmodalitäten würden automatisch eine Entlastung für das beim Biomasseimport auftretende Problem der Emissionsverlagerung in Entwicklungsländer bieten. Da beim Import von Biomasse für die energetische Nutzung bzw. von Holz für die stoffliche Nutzung das importierende Land für die bei der Nutzung entstehenden Emissionen verantwortlich ist, besteht zunächst kein Anreiz, aus Klimaschutzgründen Biomasse zu importieren. Um Möglichkeiten zu schaffen, in Annex-I-Staaten genutzte, aber in Nicht-Annex-I-Staaten produzierte Biomasse, deren anbaubedingte Emissionen niedrig sind, als Klimaschutzmaßnahme anzuerkennen, könnte ein spezieller Mechanismus geschaffen werden. In Anlehnung an den CDM könnte hier projektbasiert vorgegangen werden: In „Projekten zum Export von Bioenergieträgern/Holzprodukten in Annex-I-Staaten" könnten die anbaubedingten Emissionen sowie die CO_2-Aufnahme in die zu exportierenden Produkte bilanziert werden, und „Kohlenstofffixierungszertifikate" ausgestellt werden. Die Ausstellung eines solchen Zertifikats wäre an die Bedingung gebunden, dass die produzierte Biomasse auch wirklich in einen Annex-I-Staat exportiert wird. Diese Zertifikate würden in Annex-I-Staaten als Treibhausgas-Reduktion anerkannt und wie eine CER-Einheit (Certified Emission Reduction) aus dem CDM (Kap. 10.2.3) gehandhabt werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass „Doppelanrechnungen" etwa im Zusammenhang mit forstwirtschaftlichen Projekten vermieden werden. Nur in Fällen, in denen die Treibhausgasbilanz viel versprechend erscheint, wird sich ein Projektentwickler für solch ein „Kohlenstofffixierungsprojekt" finden. In allen anderen Fällen sollte der Export aus Nicht-Annex-I-Staaten nicht durch das Klimaregime gefördert werden. Dieser Ansatz würde dazu beitragen, dass direkt durch exportierte Bioenergie hervorgerufene Landnutzungsänderungen, z.B. Entwaldung, in Nicht-Annex-I-Staaten vermieden wird. Allerdings bedarf es zusätzlicher Instrumente, um zu verhindern, dass es indirekt zu erheblichen Kohlenstofffreisetzungen kommt, wenn nämlich die bisherige Landnutzung auf andere kohlenstoffreiche Flächen ausweicht. Eine Möglichkeit, die damit verbundenen Emissionen quantitativ abzuschätzen, wird in Kapitel 7.3 diskutiert (Kasten 7.3-1).

Konsequenterweise sollte in einem solchen System der Import von Bioenergieträgern aus Annex-I-Staaten durch Nicht-Annex-I-Staaten damit einhergehen, dass das in den Produkten enthaltene CO_2 sofort als Emission des Annex-I-Staates angerechnet wird, da die Produkte den „Anrechnungsraum" verlassen haben.

Landnutzungsänderungen in Nicht-Annex-I-Staaten/Vermiedene Entwaldung

Das geschilderte Anrechnungssystem könnte einen Großteil der in Kapitel 10.2.2.1 dargestellten Probleme entschärfen. Es löst jedoch nicht den negativen Effekt, dass eine zunehmende Bioenergieproduktion in Nicht-Annex-I-Staaten den Druck auf die Wälder erhöht. Während sich die direkte Umwandlung von Wald in Bioenergieplantagen oder die „Waldernte" durch einen auf Bioenergie konzentrierten Ansatz weitgehend erfassen lassen (Kap. 10.3), sind die indirekten Effekte, nämlich das Ausweichen anderer agrarischer Produktionen auf bisherige Waldflächen, letztlich nur durch einen umfassenderen Ansatz regulierbar.

Optionen zur Reduzierung der zunehmenden Entwaldung in Entwicklungsländern werden gegenwärtig innerhalb der Klimarahmenkonvention verhandelt (Kasten 10.2-2).

Falls im Rahmen des REDD-Prozesses ein effektives Regime zur Verminderung der Emissionen aus Entwaldung und Walddegradation geschaffen wird, sollte eine Voraussetzung für Entwicklungsländer für die Teilnahme an „Kohlenstofffixierungsprojekten" ihre Mitgliedschaft in diesem REDD-Regime ist. Ein geeignetes REDD-Regime sollte nach Auffassung des WBGU zumindest folgende Eckpunkte umfassen:

- Es sollte wirksame Anreize setzen, rasche reale Emissionsminderungen durch eine Reduzierung

Kasten 10.2-2

Reducing Emissions from Deforestation and Degradation (REDD) in der UNFCCC

Auf Vorschlag von Papua Neuguinea und Costa Rica wurde auf der 11. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention 2005 in Montreal ein neues Thema auf die Tagesordnung gehoben: Die Einbeziehung von Emissionen aus Entwaldung in Entwicklungsländern in das Klimaschutzregime. Diese Emissionen machen mehr als 20 % der anthropogenen CO_2-Emissionen aus. Während für die Industrieländer ein Anreiz besteht, während der ersten Kioto-Verpflichtungsperiode 2008–2012 auf Entwaldung zu verzichten, da die damit verbundenen Emissionen grundsätzlich auf die erlaubten Emissionen angerechnet werden, bestehen für Entwicklungs- und Schwellenländer keine entsprechenden Anreize. Allerdings haben sich alle Unterzeichnerstaaten der Klimarahmenkonvention verpflichtet, die Erhaltung und Verbesserung ihrer Senken, darunter Wälder, zu fördern (Art. 4.1d UNFCCC).

Das Thema wurde 2007 in den Bali-Aktionsplan aufgenommen, der die Aushandlung eines neuen Klimaregimes für die Zeit nach 2012 regelt. Das Regime soll auf der 15. Vertragsstaatenkonferenz im Dezember 2009 in Kopenhagen verabschiedet werden. Konkret sollen Politiken und Anreize zur Reduktion von Emissionen aus Entwaldung und Walddegradation in Entwicklungsländern geschaffen werden. Dabei soll auch die Rolle von Walderhalt („conservation"), nachhaltiger Waldbewirtschaftung und Ausweitung der Kohlenstoffvorräte in Wäldern sowie Aufforstung, diskutiert werden. Noch ist offen, welche Politikinstrumente eingesetzt werden. Die verschiedenen Finanzierungsmöglichkeiten und die Art der einzubeziehenden Aktivitäten sind Gegenstand der Verhandlungen. In der Zwischenzeit sind die Länder aufgerufen, laufende Anstrengungen zur Vermeidung dieser Emissionen zu stärken und vorbereitende Maßnahmen für ein zukünftiges Regime zu treffen – etwa die Erfassung von Daten, die Durchführung von Pilotprojekten usw.

Die Kosten zur Reduzierung eines relevanten Anteils der Emissionen aus Entwaldung werden auf mehrere Mrd. US-$ jährlich geschätzt, wobei die Opportunitätskosten (entgangene Einnahmen aus Entwaldung) den größten Teil dieser Kosten darstellen (Grieg-Gran, 2006; Nabuurs et al., 2007). Viele Entwicklungsländer vertreten die Meinung, diese Finanzmittel sollten durch die Industrieländer aufgebracht werden, indem diese ihre Emissionsreduktionsziele verschärfen und dann auf dem internationalen Kohlenstoffmarkt gewissermaßen REDD-Zertifikate erwerben (FCCC/SBSTA/2007/MISC.14). Dies wird aber etwa von Brasilien nicht geteilt: Brasilien ist an einer freiwilligen Vereinbarung interessiert, bei der Industrieländer in einen Fonds zahlen, aus dem erreichte Emissionsminderungen in Entwicklungsländern im Nachgang vergütet werden (FCCC/SBSTA/2007/MISC.2). Während die Industrieländer als Messgröße nationale Emissions- bzw. Entwaldungsraten heranziehen möchten, um Leakage-Effekte zu vermeiden, sind einige Entwicklungsländer (z.B. Kolumbien, Paraguay, Peru) an projektbasierten bzw. subnationalen Lösungen interessiert.

der Entwaldung zu erreichen. Diese Emissionsminderungen sollten jeweils auf nationaler Ebene erreicht werden, um Leakage-Effekte zu vermeiden.

- Über die unmittelbare Reduktion der Emissionen hinaus sollten Anreize geschaffen werden, die natürlichen Kohlenstoffspeicher (tropische Primärwälder) dauerhaft vor Entwaldung und Degradation zu schützen.
- Es sollten auch Anreize zur Vermeidung von Emissionen aus Graslandumbruch gesetzt werden.
- Perverse Anreize, z.B. Anreize zur verstärkten Zerstörung, um dann für das Unterlassen besonders hoch entlohnt zu werden, müssen ausgeschlossen werden.
- Das Regime muss internationale Finanztransfers in ausreichender Höhe mobilisieren.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sollte das Regime aus einer Kombination von nationalen Zielen und projektbasierter Vorgehensweise bestehen: Beispielsweise könnten sich die teilnehmenden Entwicklungsländer verpflichten, ihre zukünftigen nationalen Emissionen aus Landnutzungsänderungen zu begrenzen. Die Höhe der Emissionsbegrenzung könnte sich zum einen an den durchschnittlichen Jahresemissionen der Vergangenheit orientieren, zum anderen könnte die Deckelung zusätzlich von der Höhe der Emissionen und der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit abhängig gemacht werden Ergänzend dazu sollten Finanztransfers von Seiten der Annex-I-Länder geleistet werden, wenn Emissionen in größerem Ausmaß als vereinbart gesenkt werden. Damit würde der Anreiz gesetzt, die bestehenden hohen Emissionen aus den Landnutzungsänderungen schnell zu senken und zugleich würde eine Mitverantwortung der Entwicklungsländer eingefordert. Zusätzlich käme in Betracht, den dauerhaften Schutz terrestrischer Kohlenstoffspeicher dadurch zu fördern, dass teilnehmende Entwicklungsländer finanzielle Unterstützung erhalten, wenn sie ausgewiesene Gebiete unter Schutz stellen. Das REDD-Regime wäre idealerweise Bestandteil einer umfassenden Vereinbarung zum Erhalt der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme innerhalb der UNFCCC (Kap. 10.2.4), in deren Rahmen auch die Finanztransfers geregelt würden.

Maßnahmen zum Senkenschutz in Entwicklungsländern werden derzeit durch verschiedene staatliche Mechanismen bzw. Mechanismen des Privatsektors finanziert (Kasten 10.2-3). Teilweise gehen diese Mechanismen über den Senkenschutz im Sinne der UNFCCC hinaus und finanzieren auch Maßnahmen z.B. zum Kohlenstoffvorratsschutz, einschließlich des Tropenwaldschutzes. Diese Mechanismen können

Kasten 10.2-3

Internationale Zahlungen für den Schutz von Kohlenstoffvorräten und -senken

Zahlungen für den Schutz von Kohlenstoffsenken und Kohlenstoffvorräten in Entwicklungs- und Schwellenländer werden im Rahmen verschiedener, in der Regel projektbasierter Mechanismen geleistet. Dabei kann zwischen Mechanismen, die eine Anrechenbarkeit auf Reduktionsverpflichtungen im Rahmen des Kioto-Protokolls prinzipiell erlauben, und solchen Mechanismen unterschieden werden, die unter dem Kioto-Protokoll keine Anrechnung finden. Den Kern der ersten Gruppe bilden die *Flexiblen Mechanismen*, d.h. der Clean Development Mechanismus (CDM) (Kap. 10.2.3) und Joint Implementation. Zahlungen, die demgegenüber nicht unmittelbar durch das Kioto-Protokoll induziert werden, sind u.a. freiwillige Zahlungen von Privatpersonen, Unternehmen oder Akteure des öffentlichen Sektors, die ihr Engagement für den Klimaschutz demonstrieren oder die von ihnen verursachten Treibhausgasemissionen ausgleichen möchten (z.B. „klimaneutrales Fliegen"). Die Ausgabe von Krediten, die auf den Kohlenstoffvorrats- oder Senkenschutz bezogen sind, ist dabei je nach Organisation an mehr oder weniger strenge Kriterien geknüpft, die eine dauerhafte Schutzwirkung gewährleisten sollen (GTZ, 2007b; Neef et al., 2007). Daneben werden Zahlungen durch verschiedene, von staatlicher Seite initiierte *Umweltfonds* geleistet, die Finanzmittel bündeln und speziell in Klimaschutzprojekte im Ausland investieren. Dies schließt meistens Projekte zu Landnutzungen, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft mit ein. Initiatoren der Fonds sind Akteure auf bundesstaatlicher Ebene (u.a. Oregon Climate Trust (OCT)) bis hin zur multilateralen Ebene (u.a. BioCarbonFund der Carbon Finance Unit (CFU) oder Forest Carbon Partnership Facility (FCPF), beide unter dem Dach der Weltbank) (Neef et al., 2007; World Bank 2006a, b, 2007; UNFCCC, 2007a). Internationale Kompensationszahlungen für den Kohlenstoffvorrats- oder Senkenschutz könnten prinzipiell aus nationalen *Emissionshandelssystemen* heraus geleistet werden: Unternehmen, die im Inland zum Erwerb von Emissionszertifikaten verpflichtet sind, könnten diese Verpflichtung durch entsprechende Investitionen im LULUCF-Sektor für anrechenbare Kohlenstoffkredite (aus dem In- oder Ausland) erfüllen. U.a. auf der schwierigen Gewährleistung einer dauerhaften Schutzwirkung ist diese Möglichkeit in nationalen Handelssystemen bisher kaum gegeben. Daher sind die internationalen Zahlungen für derartige Landnutzungen in diesem Kontext bisher kaum von Bedeutung. Auch außerhalb des CDM wird lediglich für die Chicago Climate Exchange (CCX) von Senkenprojekten im Ausland berichtet, die Wälder mit einschließen (Neef et al., 2007).

auch künftig ein Regime der UNFCCC ergänzen; sie können aber eine umfassende Lösung innerhalb der UNFCCC (Kasten 10.2-2) nicht ersetzen.

10.2.3 Bioenergie und der Clean Development Mechanismus (CDM)

Die Zielsetzung des CDM beschreibt das Kioto-Protokoll in Art. 12, Abs. 2: Entwicklungsländer sollen dabei unterstützt werden, eine nachhaltige Entwicklung zu erreichen und zum Ziel der Klimarahmenkonvention beizutragen. Zugleich soll es den Industrieländern erleichtert werden, ihre Verpflichtungen über Emissionsbegrenzungen bzw. –reduktionen kostengünstig zu erfüllen. Der CDM bietet Anreize für Investoren, Maßnahmen zur Treibhausgasreduktion in Entwicklungsländern zu finanzieren oder durchzuführen. Die Investoren erhalten dafür Zertifikate über Emissionsminderungen (certified emissions reductions, CER), die handelbar sind. Annex-I-Staaten können sich erworbene CER anrechnen lassen, so als hätten sie ihre eigenen Emissionen gemindert.

10.2.3.1 Bestehende Regelungen zur Bioenergie und ihre Bewertung

Bioenergie wird im CDM vor allem über Projekte zur Bioenergienutzung in Entwicklungsländern angesprochen. In bestimmten Fällen können auch Aspekte von Landnutzung und Landnutzungsänderungen und ihre Behandlung im CDM relevant sein. Mit der Bioenergienutzung in Entwicklungsländern können Emissionsreduktionen durch eine *Substitution* fossiler durch biogene Energieträger erzielt werden (Kap. 4.1, 7.2 und 10.8). Daneben können unter bestimmten Voraussetzungen auch *Effizienzsteigerungen* bei bestehenden traditionellen Bioenergienutzungen zu Emissionsreduktionen beitragen. Dies ist der Fall, wenn durch die Effizienzsteigerungen weniger Brennholz verbraucht und infolgedessen bestehende terrestrische Kohlenstoffspeicher nicht degradiert bzw. langlebige Holzprodukte nicht konvertiert werden. Hinzu kommen Reduktionen von Nicht-CO_2-Emissionen durch eine effizientere Endenergienutzung (Verbrennung) (Jürgens et al., 2006). Schließlich kann der Anbau von Biomasse für eine energetische Nutzung so gestaltet werden, dass eine *(temporäre) CO_2-Senke* entsteht, d.h. durch den gezielten Pflanzenanbau für die energetische Nutzung wird der Atmosphäre (vorübergehend) CO_2 entzogen und in Biomasse gebunden (Schlamadinger et al., 2001).

Nach gegenwärtigen Regelungen des CDM wird jedoch nur ein Teil der möglichen Maßnahmen zur Emissionsreduktion und Senkenbildung fördert. Die Gewährung von Minderungsgutschriften für Emissionsreduktionen und die Durchführung von CDM-Projekten folgt festgelegten Modalitäten und Verfahren. Um die Wirksamkeit eines Projektes für den Klimaschutz zu gewährleisten, muss im Vorfeld die erwartete Emissionsvermeidung gegenüber einem theoretischen Referenzfall (*Baseline*) bestimmt werden. Für die Erstellung einer Baseline sowie für das Monitoring müssen vom CDM-Exekutivrat genehmigte *Methoden* verwendet werden. Für neue Projektentwürfe kann auf bereits genehmigte Methoden zurückgegriffen oder eine neuartige Methode zur Genehmigung eingereicht werden (Sterk und Arens, 2006).

CDM-Fähigkeit von Projekten zur Nutzung von Bioenergie

In der Baseline werden prinzipiell nur solche *Emissionen* erfasst, die im Annex A des Kioto-Protokolls aufgeführt sind. Dies sind in erster Linie Emissionen aus fossilen Energien und Nicht-CO_2-Emissionen (Jürgens et al., 2006). Emissionsreduktionen in Folge der *Substitution fossiler Brennstoffe* durch Biomasse sind somit vom Grundsatz her CDM-fähig. CDM-fähig ist u.a. die Verwertung von biogenen Reststoffen und erneuerbarer organischer Biomasse.

Weniger eindeutig ist die CDM-Fähigkeit von Emissionsreduktionen, die etwa in privaten Haushalten oder Kleinunternehmen mit Rahmen der traditionellen Bioenergienutzung herbeigeführt werden, indem *energieeffizientere Nutzungsformen* verwendet werden: Bei der energetischen Nutzung werden die bei der Verbrennung entstehenden CO_2-Emissionen nicht dem Energiesektor zugerechnet (Kap. 10.2.2), sondern sie sind indirekt in den Emissionen im Landnutzungssektor enthalten, für den – mit Ausnahme von Aufforstungs- und Wiederaufforstungsmaßnahmen – keine CDM-Projekte (Höhne et al., 2007) vorgesehen sind. Eine Reduktion der CO_2-Emissionen aus traditioneller Bioenergienutzung ist daher anders als die Reduktion von Nicht-CO_2-Emissionen oder die Substitution fossiler Energieträger zunächst nicht im CDM anrechenbar.

Eine CDM-Fähigkeit von Projekten zur Verbreitung effizienter Öfen, Herde usw. in Haushalten lässt sich allerdings durchaus begründen: Wenn eine ineffiziente traditionelle Biomassenutzung über kurz oder lang zu einer nachhaltigen Ressourcenschädigung durch Entwaldung oder Bodendegradation führen würde und in der Folge auf fossile Brennstoffe ausgewichen werden müsste, dann substituiert eine effizientere thermische Nutzung von Biomasse in der Gegenwart fossile Brennstoffe, deren Einsatz sonst langfristig notwendig würde. Für eine die Zulassung solcher CDM-Projekte zur Effizienzsteigerung sprechen außerdem die gesundheitlichen und sozioökonomischen Vorteile sowie die Möglichkeit, künftig Projekte verstärkt in ärmeren Entwicklungsländern und in dortigen ländlichen Gebieten anzusiedeln, welche bisher im Projektportfolio des CDM deutlich unterrepräsentiert sind (Schneider, 2007b; JIKO, 2007; UNFCCC, 2008b).

Aktuelle Entwicklung unter der UNFCCC gehen in die Richtung Methoden für kleinskalige CDM-Projekte zu erlauben, die einen Übergang zu einer nachhaltigen, energetischen Biomassenutzung, z.B. über Biogasöfen bzw. hocheffiziente Kochofen mit Biomasse, ermöglichen (Schneider, 2007b; Schlamadinger et al., 2007; JIKO, 2007; UNFCCC, 2008b).

CDM-Fähigkeit von Senken in Verbindung mit der Biomasseproduktion für Bioenergie

Von Biomasse, die explizit für eine energetische Nutzung produziert wird, geht eine zumindest temporäre CO_2-Senkenwirkung aus, die unter Umständen auch im CDM honorierbar wäre und somit Anreize für bestimmte Formen der Bioenergienutzung, z.B. Kurzumtriebsplantagen setzen könnte (Schlamadinger et al., 2001; Dutschke et al., 2006). Für Projekte, die eine Kohlenstoffaufnahme (Senkenfunktion) vorsehen, gelten die derzeitigen Regelungen zu Landnutzungsänderungen und Waldwirtschaft, die in den Marrakesh Accords vereinbart sind. Nach derzeitigen Verfahrensregeln sind nur Methoden der Landnutzungen, die zur Aufforstung und Wiederaufforstung führen, zulässig (Höhne et al., 2007; Kasten 10.2-2); Maßnahmen zum unmittelbaren Erhalt bestehender terrestrischer Kohlenstoffvorräte oder zur Begrünung von degradiertem Land werden nicht mit CDM-Gutschriften honoriert (Jürgens et al., 2006).

Das bislang einzige registrierte Wiederaufforstungsprojekt in China mit einer Laufzeit von 2006 bis 2036, steht nicht mit Bioenergie in Verbindung (UNFCCC, 2008a). Weitere (Wieder-)Aufforstungsprojekte sind derzeit in der Prüfungsphase ebenso wie Methoden hierzu sowie Methoden, die eine Kopplung von (Wieder-)Aufforstung und anschließender (kommerzieller) Biomassenutzung vorsehen (UNEP Risoe, 2008).

Überblick über CDM-Projekte zur Bioenergie

Biogene Energieträger sind Gegenstand des CDM in verschiedenen Projekt-Kategorien. Projekte zur Bioenergie (‚Biomass Energy') beziehen sich auf Festbrennstoffe. Gasförmige Energieträger werden in Biogas-Projekten sowie in Projekten zu Deponiegas angesprochen, sofern dabei die Nutzung zur Strom-

Kasten 10.2-4

Globale Umweltfazilität und Bioenergie

Die energetische Nutzung von Biomasse wird im GEF-Schwerpunkt Klimawandel als Option zur Verringerung von Treibhausgasemissionen angesprochen. Die GEF soll jedoch keine Aufgaben übernehmen, die bereits über die Flexiblen Mechanismen, speziell den CDM, finanziert werden. Entsprechend ist die Strategie der GEF nicht die direkte Förderung bestimmter Technologien für erneuerbare Energien, sondern vorrangig die Schaffung eines geeigneten Marktumfeldes sowie die Beseitigung von (Markt-)Entwicklungsbarrieren. In der aktuellen GEF-4 Strategie geht es im Klimaschutzfenster u.a. um die *Förderung einer nachhaltigen Energie aus Biomasse*. Insgesamt soll neben der Bioenergiegewinnung aus Reststoffen nun vermehrt die gezielte Biomasseproduktion für energetische Zwecke unterstützt werden. Dabei sollen explizit auf effiziente Technologien geachtet und negative Effekte der Bioenergienutzung durch Entwaldung oder Bodendegradation sowie eine Gefährdung der Ernährungssicherheit ausgeschlossen werden. Ebenso soll ein Ansatz zur Zertifizierung von nachhaltiger Biomasse für den Programmbereich entwickelt werden (GEF, 2007a, c). Im Rahmen des Small Grants Programme sind bereits Demonstrationsprojekte zu Biokraftstoffen finanziert worden (GEF und UNDP, 2006). In der laufenden GEF-4 Periode (2006–2010) sollen Mittel für die Erforschung und Entwicklung einer nachhaltigen Nutzung von Biokraftstoffen eingesetzt werden (GEF, 2007b). Dieser Programmbereich ist Teil des Unterprogramms „Mitigation“ im GEF-Klimaschutzfenster, das insgesamt mit knapp 1 Mrd. US-$ für vier Jahre ausgestattet ist (GEF, 2006).

erzeugung beabsichtigt ist (IGES, 2008). Bis Oktober 2008 waren insgesamt 609 Projekte zur Bioenergie eingereicht (224 waren registriert) und 243 (67) zur energetischen Biogasnutzung. Hinzu kommen 299 (103) Deponiegas-Projekte, wovon 101 (37) die Stromerzeugung vorsehen. Die erwarteten Emissionseinsparungen aller 609 Bioenergieprojekte betragen 36,6 Mt CO_2eq pro Jahr. Das sind 6,7 % der insgesamt durch alle 3967 eingereichten CDM-Projekte erwarteten jährlichen Emissionseinsparungen (546 Mt CO_2eq). Biogas-Projekte fallen dahinter zurück (11,5 Mt CO_2eq; 2,1 %). Für Deponiegas-Projekte zur Stromerzeugung wird insgesamt eine jährliche Vermeidung von 20,8 Mt CO_2eq (3,8 %) erwartet. Im Verhältnis zu den übrigen Marktsegmenten nimmt der Sektor der Bioenergienutzung damit bisher einen mittleren Rang ein (UNEP Risoe, 2008; IGES, 2008). 2006 wurden weltweit CER im Wert von 475 Mio. t gehandelt und mit einem Wert von mehr als 5 Mrd. US-$ taxiert (Worldwatch Institute, 2008).

In den bisher registrierten Bioenergieprojekten ging es bislang fast ausschließlich um biogene Reststoffe, die in der Landwirtschaft (hier vor allem Bagasse und Reishüllen) sowie im Forstsektor und der holzverarbeitenden Industrie (u.a. Sägemehl, Schwarzlauge) anfallen (UNEP Risoe, 2008; IGES, 2008). 2006 wurde erstmals ein kleinskaliges Projekt zu ‚Forest Biomass' registriert, in dem in Brasilien Flüssiggas in der Verbrennung durch Holz aus Eukalyptus-Wäldern ersetzt wird, die für die energetische Nutzung auf degradiertem Land angelegt wurden (UNFCCC, 2008b). 2008 wurden erstmals Methoden genehmigt, welche die Produktion von Biokraftstoffen auf Basis von wieder verwendeten Fetten und Ölen bzw. auf Pfanzenölbasis zum Gegenstand haben. Weitere Methoden zu Biokraftstoffen sind in der Überprüfungsphase (JIKO, 2008). Auf Basis der beiden genehmigten Methoden wurden bisher 7 Projekte zur Biodieselnutzung zur Bewertung eingereicht (UNEP Risoe, 2008). In einzelnen dieser Projekte ist die Verwendung von Energiepflanzen vorgesehen, wenn auch bisher für den Eigenverbrauch der Kraftstoffe in der Landwirtschaft oder im öffentlichen Nahverkehr (UNFCCC, 2008c, d).

In der regionalen Verteilung der 609 eingereichten Bioenergieprojekte dominieren Indien (306) und Brasilien (100) gefolgt von China (52) und Malaysia (33). Die meisten Biogas-Projekte (242) wurden in Thailand (46), Mexiko (34), Indien (32) sowie den Philippinen (31) konzipiert. China(32) und Mexiko (11) beherbergen auch die meisten der Deponiegas-Projekte zur energischen Nutzung (101). Wie auch in anderen CDM-Sektoren zeigt sich damit, dass Projekte zur Bioenergienutzung eher in Asien und Lateinamerika sowie in Schwellenländer bzw. Ländern mit mittleren Einkommen durchgeführt werden. Internationale Zahlungen im Rahmen des CDM werden teilweise durch Zahlungen im GEF-Klimaschutzfenster flankiert (Kasten 10.2-4).

Bewertung

Der Großteil der globalen Bioenergieproduktion findet (auch und trotz der erwarteten Zunahme an Projekten in der Zukunft) außerhalb des CDM statt. Der CDM kann so allenfalls ein flankierendes Instrument sein, um dazu beizutragen, dass sich Bioenergieproduktion und -nutzung auf einem nachhaltigen Pfad bewegen. Dennoch ist es wichtig, dass Anreize zur Nachhaltigkeit gesetzt werden und vor allem, dass durch die Bestimmungen zum CDM keine Anreize für eine verstärkte nicht nachhaltige Produktion und Nutzung von Bioenergie ausgehen.

Mit dem CDM ist es zwar einerseits gelungen, einen internationalen Markt für Vermeidungsaktivitäten zu entwickeln. Andererseits wird hinterfragt, inwieweit der CDM sein Ziel, nachhaltige Entwicklung in Entwicklungsländern zu fördern, erreicht hat,

und ob tatsächlich ein ökologisch nachhaltiger Klimaschutz unterstützt wird (Schneider, 2007b). Diese grundsätzlichen Probleme des CDM lassen sich auch anhand der Möglichkeiten von Bioenergieprojekten darstellen:

Im Bezug auf das Ziel der Förderung einer nachhaltigen Entwicklung fällt auf, dass für Bioenergie wie auch für andere Sektoren gilt, dass ärmere Entwicklungsländer, in denen Formen traditioneller Bioenergie dominieren (Kap 4.1 und 10.8), bisher kaum Ziel von Projektaktivitäten waren (Jürgens et al., 2006; JIKO, 2007). Gerade in diesen Regionen könnte jedoch der CDM einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten: Durch eine angepasste Bioenergienutzung lassen sich lokale Luftverschmutzung und Innenraumverschmutzung reduzieren, die ländliche Energieversorgung kann verbessert sowie die armutsbedingte Abholzung und Bodendegradation gemindert werden. Entsprechend rät der Beirat dazu, im Zuge der Diskussion in den CDM-Gremien zu nicht-erneuerbarer Biomasse darauf hinzuwirken, dass Projekte zur Substitution ineffizienter traditioneller Bioenergienutzung leichter zum Zuge kommen. Dabei gilt es durchaus strenge, jedoch erfüllbare Maßstäbe an den Erfolg und vor allem die Dauerhaftigkeit der Effizienzsteigerung und der modernen Biomassenutzung anzulegen. Andernfalls würde eine zentrale Begründung für eine Integration in den CDM hinfällig, dass nämlich moderne Biomassenutzung langfristig den Einsatz fossiler Energieträger mindert. Im noch stärkeren Maße gelten diese Anforderungen für Projekte zur Substitution fossiler Kraftstoffe durch Biokraftstoffe. Im Übrigen bleibt das Ergebnis des REDD-Prozesses abzuwarten (Kasten 10.2-2). Sollte sich ein geeignetes Regime zur Honorierung für vermiedene Entwaldung und Degradation durchsetzen, könnte die Förderung von Projekten zur Emissionsminderung bei traditioneller Biomassenutzung gegebenenfalls hier ihren Raum finden.

Allerdings bergen CDM-Projekte zur Substitution fossiler Energie durch Bioenergie – wie die zunehmende Bioenergienutzung insgesamt – auch Risiken für den Klimaschutz: Viele Bioenergieprojekte gehen nicht mit einem sinkenden, sondern – möglicherweise mit Ausnahme der Reststoffverwertung – mit einem steigenden Bedarf an Biomasse einher. Damit verstärkt sich direkt die Entnahme von Biomasse aus der Natur bzw. es steigt der Druck zur Konversion von Wald und Grasland für den Anbau von Energiepflanzen. Hinzu kommt die Gefahr, dass insbesondere in angrenzenden Regionen die Konversion von weitestgehend intaktem Wald oder Grasland für die übrigen agrarischen Nutzungen (z. B. Beweidung, Nahrungsmittelproduktion) zunimmt, nämlich in mittelbarer Folge des verstärkten Anbaus von Energiepflanzen und der Verdrängung dieser übrigen Nutzungsformen auf andere Flächen. Im Ergebnis werden damit außerhalb des etwaigen CDM-Projekts Treibhausgasemissionen durch Landnutzungsänderungen verursacht, die nicht oder nur unzureichend von den zertifizierten Emissionsreduktionen abgezogen werden. Es wird daher diskutiert, ob Leakage-Effekte, die durch die CDM-geförderte Bioenergienutzung entstehen, dadurch abgemildert werden können, indem CDM-Projekte zur Bioenergie mit Aufforstungsmaßnahmen kombiniert werden (Dutschke et al., 2006; Schlamadinger et al., 2006).

10.2.3.2 Möglichkeiten einer Weiterentwicklung der Regelungen

Die Ausgestaltung der CDM-Projekte hat derzeit nur sehr begrenzten Einfluss auf die Bioenergienutzung in Entwicklungsländern. Solange nicht sichergestellt werden kann, dass es in Folge des Anbaus von Energiepflanzen als Landnutzungsform, wie z. B. der Bepflanzung von vorher anders genutzten Anbauflächen, zu Leakage-Effekten kommt und andernorts terrestrisch gespeicherter Kohlenstoff freigesetzt wird, muss einer Ausweitung derartiger CDM-Projekte mit Skepsis begegnet werden. Da es praktisch nicht möglich ist, umfassende Treibhausgas-Bilanzen solcher Projekte zu erstellen, die alle Neben- und Fernwirkungen einschließlich Leakage-Effekte weitestgehend präzise beziffern, könnten Hilfskriterien angelegt werden. So könnte etwa jede zertifizierte und gutgeschriebene Emissionsreduktion durch einen durchschnittlichen oder landestypischen Leakage-Abzug gemindert werden.

Der alternative Ansatz, Projekte zum verstärkten Einsatz von Bioenergie an (Wieder-)Aufforstungsmaßnahmen zu koppeln, könnte hingegen im Extrem Leakage-Effekte nicht mindern, sondern sogar erhöhen, da es nun wiederum zur Verdrängung der Aktivitäten auf der aufzuforstenden Fläche in andere Regionen kommen könnte. Letztlich ist hierfür weniger die Bioenergiepolitik im Speziellen, sondern die Behandlung von Landnutzung und Landnutzungsänderungen entscheidend. So ist mit Anpassungen im CDM an Neuregelungen zum LULUCF-Sektor im Rahmen eines Post-2012-Regime zu rechnen. Es ist möglich, dass die Vertragsstaaten der UNFCCC in diesem Rahmen die Behandlung des LULUCF-Sektors auf Basis der Erfahrungen der ersten Verpflichtungsperiode grundlegend neu regeln werden. Dann muss bestimmt werden, welche Rolle der CDM in diesem Regime zur Landnutzung einnehmen soll. Insbesondere die Leakage- und Permanenzproblematiken sprechen dafür, grundsätzlich mit den oben

angedachten Hilfskriterien zu arbeiten und dem CDM insgesamt keine tragende Rolle bei der Emissionsreduktion im LULUCF-Sektor zukommen zu lassen.

Der potenzielle Spielraum des CDM, durch Projekte zur Bioenergienutzung zur Substitution fossiler Brennstoffe beizutragen, sollte hingegen ausgebaut werden. Allerdings sollte noch strenger und konsistent überprüft werden, dass die eingesetzte Bioenergie – „von der Wiege bis zur Bahre“ (Kap. 10.2.2.2) – tatsächlich Treibhausgasemissionen gegenüber der Nutzung fossiler Brennstoffe einspart. Nur für diese Einsparungen sollten CER ausgestellt werden. In Zweifelsfällen sollten Projektaktivitäten eher abgelehnt als durch CER gefördert werden. Dafür sollte die Anwendung strenger Kriterien sorgen. Leakage-Effekte werden bisher nach der General Guidance on Leakage in Biomass Project Activities im Anhang der Indicative Simplified Baseline and Monitoring Methodologies for Selected Small-scale CDM Project Activity Categories berücksichtigt (UNFCCC, 2006). Diese Regelungen bilden eine gute Grundlage für strenge Kriterien bzw. sollen dahingehend weiterentwickelt werden.

Im Bereich von Bioenergieprojekten zur Minderung ineffizienter traditioneller Bioenergienutzung sollte der CDM genutzt werden, um zur Verbreitung entsprechender Technologien in ärmeren Entwicklungsländern und im ländlichen Räumen beizutragen und somit dem vermehrten Einsatz fossiler Brennstoffe vorzubeugen. Aktuelle Entwicklungen unter der UNFCCC gehen in die Richtung, vereinfachte Methoden für kleinskalige CDM-Projekte zu erlauben, die einen Übergang zu einer nachhaltigen, energetischen Biomassenutzung, z.B. über Biogasöfen oder hocheffizienter Kochöfen mit Biomasse ermöglichen (UNFCCC, 2008b). Weitere Regelungsänderungen könnten zusätzliche Möglichkeiten für Projekte zur effizienteren energetischen Nutzung von Biomasse auf Ebene der individuellen Haushalte und Kleinbetriebe eröffnen sowie für Projektentwickler eine unter Transparenzgesichtspunkten einfachere Handhabung erlauben. Dabei müssten durch den CDM klare Anreizwirkungen geschaffen werden. Gleichzeitig könnten hier hilfsweise pauschale Abschläge auf Minderungsgutschriften zum Tragen kommen, um etwa zu berücksichtigen, dass die Emissionsreduktionen durch Effizienzverbesserungen teils dadurch kompensiert werden, dass z.B. häufiger gekocht oder intensiver geheizt wird.

Eine deutlich andere Herangehensweise würde sich ergeben, wenn mit der automatischen Annahme der Nullemission beim Verbrennen von Bioenergieträgern gebrochen würde und die mit Bioenergie verbundenen Emissionen anders gezählt und angerechnet würden (Kap. 10.2.2): Wenn die CO_2-Aufnahme der Pflanzen beim Aufwuchs mit den Emissionen des Anbaus und der Ernte vor Ort verrechnet und die Emissionen der Nutzung am Ort der Nutzung gerechnet würden, dann wären Projekte zur Steigerung der Effizienz traditioneller Biomasse unmittelbar für den CDM anrechenbar. Das mengenmäßige Potenzial der Minderungsgutschriften, die durch die Substitution fossiler Brennstoffe durch Bioenergie erteilt werden könnte, würde hingegen spürbar sinken.

10.2.4 Ansätze einer integrierten post-2012-Lösung

Aus Sicht des WBGU ist es von übergeordneter Wichtigkeit, dass die für 2009 in Kopenhagen terminierten Beschlüsse für ein Post-2012-Regime so ausgestaltet sind, dass sie zu einer schnellen Trendumkehr der globalen Treibhausgasemissionen führen. Um die Klimaleitplanke des WBGU einzuhalten, ist es wichtig, dass einerseits diese Trendumkehr möglichst früh, d.h. innerhalb weniger Jahre nach Verabschiedung des Regimes, erreicht wird, und dass andererseits schon jetzt das Fundament für eine langfristige, stetige Abnahme der globalen Emissionen bis über die Mitte des Jahrhunderts hinaus gelegt wird (WBGU, 2008). Dafür ist es unabdingbar, dass geeignete Anreizsysteme zur Senkung der Emissionen in allen relevanten Sektoren vereinbart werden, die jeweils möglichst viele Länder umfassen. Es müssen aber nicht notwendigerweise alle Sektoren demselben Anreizsystem unterliegen. Die Aufnahme und Emission von CO_2 aus der terrestrischen Biosphäre unterscheidet sich in vielen grundlegenden Aspekten – etwa Messbarkeit, Reversibilität, langfristige Kontrollierbarkeit, zwischenjährliche Schwankungen – von den Emissionen aus fossilen Energieträgern (Kap. 5.5). Der WBGU hat auch aus diesen Gründen in seinem Sondergutachten 2003 vorgeschlagen, innerhalb der UNFCCC ein separates Protokoll zum Schutz terrestrischer Kohlenstoffspeicher zu vereinbaren. Im Folgenden wird dieser Vorschlag aufgegriffen.

Anhang A des Kioto-Protokolls listet diejenigen Sektoren auf, auf die sich die Reduktionsverpflichtungen der Annex-I-Staaten beziehen. Hier sind Emissionen aus Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LUCF) nicht enthalten. Dennoch ist es Annex-I-Ländern unter den bisherigen Regelungen möglich, sich ausgewählte Emissionsreduktionsmaßnahmen in diesen Bereichen auf ihre Reduktionsverpflichtungen anrechnen zu lassen.

Wie oben diskutiert erachtet es der WBGU für notwendig, dass die CO_2-Emissionen aus dem LULUCF-Bereich systematisch und vollständig in

das post-2012-Regime einbezogen werden, damit der Anreiz, den die UNFCCC zur Bioenergienutzung gibt, sich an ihrem tatsächlichen Klimaschutzbeitrag orientieren kann. Diese Korrektur des Anreizes wird außerdem erheblich erleichtert, wenn auch die Zuordnung der Emissionen bei der Bioenergienutzung nach dem Ort und Zeitpunkt ihrer Entstehung erfolgt (Kap. 10.2.2).

Der WBGU rät dazu, zukünftig nicht eine nationale Obergrenze für alle Emissionen (Sektoren des Anhang A und LULUCF-Sektor) zu vereinbaren, sondern für den Bereich des LULUCF gesonderte Verpflichtungen vorzusehen. Für solche gesonderten Verpflichtungen sprechen folgende Gründe:

1. Es kann auf diese Weise vermieden werden, dass die erheblichen Messungenauigkeiten, zwischenjährlichen Schwankungen, vergleichsweise schlechte Planbarkeit usw. des LULUCF-Sektors die Zielgenauigkeit von Maßnahmen in den Annex-A-Sektoren erschweren;
2. Es kann so vermieden werden, dass lock-in-Effekte in emissionsintensive Technologien in den Annex-A-Sektoren (etwa Energieerzeugung, Verkehrsinfrastruktur usw.) entstehen, indem durch kurzfristige Erfolge im LULUCF-Sektor auf Investitionen in den anderen Sektoren verzichtet wird und Technologieentwicklungen verzögert werden (WBGU, 2007) – letztlich wird die fossile Energienutzung den Ausschlag geben, ob die 2°-Leitplanke eingehalten werden kann oder nicht, da die LULUCF-Maßnahmen begrenzt sind (Kap. 5.5);
3. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Charakteristika der Sektoren (auch bezüglich der Zeitdynamik) sind separate Minderungsziele im Hinblick auf die Einhaltung der 2°C-Leitplanke (Kap. 3) zielführender als ein übergreifendes Minderungsziel, bei dem der Markt anhand der Grenzvermeidungskosten für kurzfristige Emissionsminderungen die Aufteilung des Ziels auf die Sektoren vornimmt;
4. Für Emissionen aus dem LULUCF-Sektor erscheint eine andere Herangehensweise für die Verteilung von Verpflichtungen sinnvoll als in den Anhang-A-Sektoren: während sich für letztere Verteilungsschlüssel gleich- oder ähnlich gearteter Verpflichtungen anbieten (z.B. Emissionsrechte, die sich an einer Angleichung der absoluten pro-Kopf-Emissionen orientieren), scheint eine Angleichung der pro-Kopf-Emissionen aus dem LULUCF-Sektor nicht unmittelbar einleuchtend, zumal es vielfach um eine Vergrößerung der Senkenfunktion geht;
5. Vor dem Hintergrund der Debatte zur Verminderung der Emissionen aus Entwaldung (REDD) im LULUCF-Sektor eröffnet sich die Möglichkeit, eine Vereinbarung zu treffen, bei der eine größere Staatengruppe als die Annex-I-Staaten mit Zielen zur Emissionsbegrenzung beteiligt ist.

Der WBGU schlägt daher vor, eine umfassende Vereinbarung zum Erhalt der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme zu verhandeln. Diese sollte erstens die Debatte zu REDD einbeziehen, zweitens die bestehenden Regelungen zur Anrechnung von Senken (auch durch CDM) auf die Minderungspflichten in den Annex-A-Sektoren ersetzen und drittens alle CO_2-Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft vollständig umfassen. Die Verteilung der Verpflichtungen sollte nach dem Prinzip der gemeinsamen aber unterschiedlichen Verantwortung erfolgen, wobei neben historischen und aktuellen Emissionen sicherlich die Ausstattung mit Wäldern und anderen terrestrischen Kohlenstoffspeichern sowie die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit eine Rolle spielen sollten. Zugleich sollten die Ziele und zwischenstaatliche Kompensationsmechanismen so gesetzt werden, dass Anreize für die Teilnahme auch möglichst vieler nicht-Annex-I-Staaten bestehen (Kap. 10.2.2.2).

Wenngleich die oben genannten Gründe für getrennte Zielvereinbarungen sprechen, hält es der WBGU aus der Perspektive ökonomischer Effizienz für angebracht, in einem zweiten Schritt eine gewisse Austauschbarkeit von Emissionsrechten aus den dem Regime zur Senkung der Emissionen in den Annex-A-Sektoren und dem Regime zum LULUCF-Sektor anzustreben. Aufgrund der Messschwierigkeiten und anderer Unsicherheiten von LULUCF-Emissionen sollte die Austauschbarkeit indes deutlich begrenzt sein und mit Abschlägen verbunden sein. Zur konkreten Gestaltung sieht der WGBU deutlichen Forschungsbedarf.

10.2.5 Zwischenfazit

Der UNFCCC einschließlich Kioto-Protokoll und Post 2012-Regime kommt eine zentrale Rolle in der internationalen Bioenergiepolitik zu: zum einen bei der Bewertung der Klimaschutzwirkungen von Bioenergienutzung, zum anderen bei der Steuerung von Anreizen für einer zumindest unter Klimagesichtspunkten nachhaltigen Bioenergienutzung. Die vorhandenen Regelungen und Anrechnungsmodalitäten innerhalb der Konvention und des Protokolls erfüllen diese Ansprüche bei Weitem nicht. Dies ist u.a. der Tatsache geschuldet, dass sich Bioenergieproduktion und -nutzung auf die Emissionen der Energie und Landwirtschaft einerseits, sowie der Landnutzung und Landnutzungsänderungen andererseits auswirken. Diese Sektoren unterliegen unterschiedlichen Erfordernissen in Bezug auf die Regelungen

von Emissionen und Emissionsminderungen. Bestehende Regelungen, die zunächst der Vereinfachung schwer erfassbarer Emissionsdaten dienen oder schlichtweg politischen Kompromissen bei Interessenkonflikten geschuldet sind, erschweren derzeit die konsistente Behandlung der Bioenergie im Klimaregime und führen zu Fehlanreizen.

Es gilt, diese Defizite des Klimaregimes so zu korrigieren, dass das Klimaschutzregime einschließlich des CDM die Nutzung von Bioenergie auf eine Weise fördert, die auch tatsächlich einen größtmöglichen Beitrag zur Vermeidung eines gefährlichen Klimawandels leistet. Es liegt jedoch auf der Hand, dass selbst ein sehr effektives und effizientes Klimaschutzregime, das zugleich alle Vorgänge im Bereich der Bioenergie konsistent bewertet und erfasst, die Einhaltung weiterer Nachhaltigkeitsdimensionen (z.B. Biosphärenschutz, globale Mindest-Nahrungsmittelproduktion) nicht sicherstellen kann. Daher und weil auch nicht zu erwarten ist, dass sich auf absehbare Zeit alle hier bedeutsamen Länder zu Emissionsobergrenzen verpflichten werden, müssen andere Institutionen eingebunden und weitere Instrumente umgesetzt werden (Kap. 10.3 ff.).

10.3 Standards für die Produktion von Bioenergieträgern

Die Definition und Einführung von umfassenden Nachhaltigkeitsstandards für Bioenergieträger ist angesichts der vom WBGU aufgezeigten Risiken der Bioenergieproduktion für Klima- und Biosphäre sowie angesichts sozialer Probleme in Zusammenhang mit der Bioenergieproduktion eine notwendige regulierende Maßnahme. Nur so können die internationale Gemeinschaft bzw. einzelne Staaten Einfluss auf die Produktionsweise (Rohstoffanbau, Konversion) von Bioenergieträgern nehmen und eine nachhaltige Erzeugung sicherstellen.

10.3.1 Die Anforderungen des WBGU an einen Bioenergiestandard

Einige europäische Länder – darunter Deutschland, Großbritannien, die Niederlande und die Schweiz – sind Vorreiter bei der Entwicklung von Nachhaltigkeitsstandards für Bioenergieträger, insbesondere für flüssige Biokraftstoffe. In der Schweiz und in Großbritannien sind Gesetze bereits in Kraft, die die Förderung oder den Import von Biokraftstoffen an die Einhaltung von entsprechenden Nachhaltigkeitskriterien knüpfen. Die Europäische Kommission legte im Jahr 2008 in ihrem Entwurf für eine neue EU-Richtlinie zur Förderung Erneuerbarer Energien ebenfalls Nachhaltigkeitskriterien vor, die für im Inland produzierte und für importierte flüssige Biotreibstoffe gelten sollen, sofern sie auf eine nationale Beimischungsquote angerechnet werden bzw. sonstigen Fördermaßnahmen wie etwa Steuerbefreiungen unterliegen sollen. Das bedeutet, dass beim Ansatz der EU-Kommission sowie auch bei den unilateralen Ansätzen der Schweiz oder Großbritanniens kein generelles Import- und Nutzungsverbot für Bioenergieprodukte besteht, die nicht diesen Standards entsprechen.

Im Gegensatz dazu empfiehlt der WBGU, Mindeststandards als grundsätzliche Voraussetzung für die Nutzung sämtlicher Bioenergieprodukte einzuführen. Dies kann zunächst auf nationaler Ebene geschehen, sollte jedoch – nicht zuletzt wegen handelsrechtlicher Überlegungen – langfristig auf internationaler Ebene erfolgen. Zudem sollte ein solcher Mindeststandard nicht nur Biokraftstoffe sondern alle Bioenergieträger aus nachwachsenden Rohstoffen und Ernterückständen betreffen. Dies umfasst Endprodukte wie Biomethan, Biokraftstoffe, Elektrizität aus Biomasse oder auch Holzpellets sowie Vorprodukte von Bioenergieerzeugnissen, d.h. Energiepflanzen und für die Energieerzeugung verwendete Holzprodukte, Pflanzenöle und Ernterückstände wie etwa Stroh und Waldrestholz. Eine Förderung für den Anbau bzw. die Bereitstellung nachwachsender Rohstoffe (Energiepflanzen, organische Reststoffe) für die energetische Nutzung sollte nur dann erfolgen, wenn dies zu einer nachhaltigen Landnutzung in besonderem Maße beiträgt (Förderkriterien für die Biomasseerzeugung: Kap. 10.3.1.2).

Grundsätzlich wäre es aus ökologischer Sicht wünschenswert, wenn die Produktion aller Biomasseprodukte, d.h. auch von Nahrungs- und Futtermitteln sowie von Biomasse für die stoffliche Nutzung, den gleichen Mindeststandards unterliegen würde. Einzig auszunehmen wären Vorgaben zum Treibhausgas-reduktionspotenzial, da diese für lebensnotwendige Güter wie etwa Nahrungsmittel nicht mit derselben Stringenz angesetzt werden sollten wie für Bioenergieträger. Dennoch sollte auch für den Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln angestrebt werden, die damit verbundenen Treibhausgasemissionen möglichst gering zu halten. Da die Einführung eines allgemeinen Biomassestandards sich jedoch als aufwändig erweist und politisch kurzfristig schwer durchzusetzen ist, kann der vom WBGU geforderte Mindeststandard für Bioenergieträger als ein erster Schritt hin zu einem globalen Landnutzungsstandard gesehen werden.

Bei der Umsetzung des Mindeststandards muss berücksichtigt werden, dass einzelne Bioenergieroh-

stoffe wie etwa Raps- und Palmöl, Soja oder Getreide sowohl für die energetische Nutzung, aber auch als Nahrungs- und Futtermittel verwendet werden können. Ein Mindeststandard für diese Produkte würde also automatisch auch Nahrungs- und Futtermittelproduzenten betreffen, was der WBGU jedoch erst in längerfristiger Perspektive empfiehlt. Deshalb sollte die Nachweispflicht zur Einhaltung des Bioenergie-Mindeststandards auf die Vertreiber der Endprodukte (z.B. Biomethan, Elektrizität aus Biomasse, Biokraftstoffe, Holzpellets) gelegt werden. Dadurch ergäbe sich für Rohstoffe und Vorprodukte zunächst nur eine indirekte Pflicht zur Einhaltung des geforderten Mindeststandards. Sie würde erst dann einsetzen, wenn klar ist, dass die Biomasse energetisch genutzt werden soll. Der Vertreiber des Bioenergie-Endprodukts müsste nachweisen können, dass die von ihm zugekauften Rohstoffe dem Mindeststandard genügen.

Eine andere Situation ergibt sich bei der Förderung des Rohstoffanbaus. Dort muss die Prüfung der Voraussetzungen für eine Förderung (Kap. 10.3.1.2) direkt bei den betreffenden Rohstoffproduzenten (in der Regel Land- und Forstwirte) stattfinden. Für beide Fälle muss folglich geregelt werden, wie mit der Bewertung von Rohstoffen und halbfertigen Bioenergieprodukten umgegangen wird. Der WBGU empfiehlt für Biomassevorprodukte bezüglich der THG-Emissionen bestimmte Anforderung an die Flächennutzung zu stellen, z.B. in Form einer Obergrenze für die Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen sowie dem Anbau, da die Emissionen beim Rohstoffanbau die Lebenszyklusbilanz eines Bioenergieträgers maßgeblich prägen. Einzelne Rohstoffe würden sich für eine Anbauförderung oder für die Weiterverarbeitung zu Bioenergie-Endprodukten nicht qualifizieren, wenn sie diese Obergrenze nicht einhalten. Die Definition eines solchen „Landnutzungsstandards“ (Kap. 10.3.1.1) würde eine spätere Ausweitung verpflichtender Standards auf alle Biomasseerzeugnisse, also auch Nahrungs- und Futtermittel sowie Biomasse für die stoffliche Nutzung, vorbereiten. Wird neben dem Rohstoffanbau auch die Konversion von Biomasse gefördert (etwa im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit) sollten außerdem für verschiedene Konversionsmethoden technische Standards definiert werden, welche den THG-Ausstoß bei der Konversion begrenzen.

10.3.1.1 Mindeststandard für Bioenergieträger

Der WBGU definiert seine Empfehlung für einen Mindeststandard für Bioenergieträger vor dem Hintergrund der in Kapitel 3 formulierten Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Bioenergie (ökologische sowie sozioökonomische Leitplanken und weitere Nachhaltigkeitsanforderungen). Der Mindeststandard ist zunächst allgemein und unabhängig von der späteren Umsetzung (national/regional/international bzw. freiwillig/gesetzlich) formuliert. Die Möglichkeiten der Umsetzung werden in Kapitel 10.3.2 aufgezeigt. Der Mindeststandard umfasst einerseits Prinzipien zum Klimaschutz, andererseits Prinzipien zum Biosphären- und Bodenschutz, zu nachhaltiger Wasser- und Landnutzung sowie Prinzipien zur Sicherung menschenwürdiger Arbeitsbedingungen bei der Produktion von Bioenergieträgern. Dabei beschränkt sich der WBGU auf wenige, unverzichtbare Prinzipien, um die Kompatibilität mit dem internationalen Handelsrecht und die Wahrscheinlichkeit einer zeitnahen Umsetzung des Mindeststandards zu erhöhen. Nach Einschätzung des WBGU kann zudem die Dimension der Ernährungssicherheit in einem Mindeststandard für Bioenergie auf Ebene einzelner Produzenten nicht adäquat erfasst werden, weshalb die Ernährungssicherheit – obgleich als Leitplanke und Nachhaltigkeitsdimension in Kapitel 3 beschrieben – nicht in den nun folgenden Prinzipienkatalog integriert wurde.

Treibhausgasemissionen durch Einsatz von Bioenergieträgern reduzieren

Der WBGU hält grundsätzlich eine Regelung für sinnvoll, bei der unter Berücksichtigung direkter und indirekter Landnutzungsänderungen mindestens eine THG-Reduktion gegenüber dem fossilen Referenzsystem von 30t CO_2eq pro TJ an eingesetzter Roh-Biomasse erreicht werden kann. Dies entspricht bei Biokraftstoffen einer THG-Reduktion von etwa 50 % im Vergleich zum fossilen Referenzsystem. Beim Nachweis einer zusätzlichen THG-Reduktion durch Koppelprodukte können diese mit berücksichtigt werden. Die Methodik zur Ermittlung der THG-Emissionen wird in Kapitel 7.3 näher erläutert.

Bezüglich des Anbaus von Biomasserohstoffen sollten die seit einem Stichtag verursachten Treibhausgas-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen inklusive der entgangenen Senkenwirkung die CO_2-Menge nicht überschreiten, die auf der entsprechenden Fläche innerhalb von 10 Jahren durch den Energiepflanzenanbau (d.h. auf der Fläche und in den Ernteprodukten) wieder fixiert werden kann („Landnutzungsstandard“). In diese Betrachtung sollten auch Emissionen, die durch den Anbau zu erwarten sind (etwa N_2O-Emissionen durch den Düngemitteleinsatz), einbezogen werden.

Kasten 10.3-1

Möglichkeiten der Erfassung von indirekten Landnutzungsänderungen in einem Bioenergiestandard

Indirekte Landnutzungsänderungen (iLUC, teils auch als leakage bezeichnet) können mit existierenden Methoden in einem Bioenergiestandard nur schwer erfasst werden. Dennoch gibt es einige methodische Vorschläge wie mit diesem Problem in Zukunft verfahren werden könnte: Einerseits könnte ein Kriterium formuliert werden, das den Anbau von Energiepflanzen auf marginale Flächen, z.B. auf Brachflächen und Flächen mit niedriger Produktivität in der Vornutzung, beschränkt. Damit werden Nutzungskonkurrenzen weitgehend vermieden, aber unter Umständen das nachhaltige Potenzial nicht voll ausgeschöpft. Weiterhin könnte das Vorhandensein von Regulierungen zur Landnutzungs- und Schutzgebietsplanung im Erzeugerland als Voraussetzung für eine Zertifizierung gefordert werden (Fehrenbach et al., 2008). Ein solches Kriterium wäre sinnvoll, aber nicht hinreichend, wenn man bedenkt, dass einerseits in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern Gesetzgebungen nicht effektiv umgesetzt werden, andererseits damit lediglich lokale und nationale, nicht aber internationale Verdrängungseffekte adressiert würden.

Alternativ kann ein zusätzlicher THG-Faktor in die Lebenszyklusanalyse eingeführt werden, der das Risiko einer möglichen indirekten Landnutzungsänderung erfasst und die zusätzlichen THG-Emissionen auf die THG-Bilanz des Bioenergieträgers aufschlägt. Ein solcher Faktor wurde z.B. vom Öko-Institut vorgeschlagen und in Modellrechnungen bereits verwendet (iLUC-Faktor; Fritsche und Wiegmann, 2008; Kap. 7.3). Der WBGU spricht sich für die Weiterentwicklung dieses Faktors aus. Dabei ist zu beachten, dass ein solcher Faktor neben den THG-Emissionen auch die Auswirkungen indirekter Landnutzungsänderungen für Biodiversität und Ernährungssicherheit berücksichtigen müsste. Aus Sicht des WBGU könnte dies in einem separaten Bewertungsmodell geschehen, mit dem abgeschätzt werden kann, welche Art von Fläche in welcher Region mit hoher Wahrscheinlichkeit für den Ersatz der verdrängten Nutzung konvertiert wird, und Rückschlüsse auf die Folgen für Biodiversität und Ernährungssicherheit zulässt. Anhand des Ergebnisses könnte ein Bioenergieträger in der Gesamtbewertung mit einem Bonus bzw. Malus versehen werden. Dies bedarf weiterer Forschungsanstrengungen, da konkrete Kausalitätsbeziehungen nur durch komplexe Modelle realitätsnah abgebildet werden können (Kap. 7.3 und 11.1.2).

Letztendlich kann das Problem indirekter Landnutzungsänderungen beim Anbau von Energiepflanzen nur vollständig gelöst werden, wenn alle Länder und alle Arten von Biomasse unter einem einheitlichen Standard erfasst sind oder bindende internationale Vereinbarungen über Anforderungen an die nationale Landnutzungsplanung (einschließlich Schutzgebietsystemen) getroffen wurden, die nachweislich von allen relevanten Biomasseerzeugerländern umgesetzt werden (Kasten 10.3-5).

Indirekte Landnutzungsänderungen vermeiden

Indirekte Landnutzungsänderungen, d.h. durch den Anbau von Energiepflanzen verursachte Verdrängung von produktiven Landnutzungen (u.a. Nahrungs-, Futtermittelanbau, Weidenutzung) in für Biodiversität und Klimaschutz wertvolle Gebiete, sollten vermieden werden. Deshalb sollten die THG-Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen in der THG-Lebenszyklusanalyse eines Bioenergieträgers berücksichtigt werden. Der WBGU empfiehlt, dazu zunächst den iLUC-Faktor des Ökoinstituts (Fritsche und Wiegmann, 2008; Kasten 7.3-2) mit 50 % des theoretischen Werts zu verwenden. Kasten 10.3-1 stellt diese und andere Methoden zur Erfassung von indirekter Landnutzungsänderungen in einem Bioenergiestandard vor.

Schutzgebiete, natürliche Ökosysteme und Gebiete mit hohem Naturschutzwert erhalten

Um biologische Vielfalt und Ökosystemleistungen zu sichern, dürfen Energiepflanzen nicht in bestehenden Schutzgebieten oder Elementen von Schutzgebietssystemen (z.B. Korridoren) angebaut werden. Ebenso dürfen Energiepflanzen nicht in Gebieten angebaut werden, die zu einem bestimmten Stichtag (z.B. 1.1.2008) als Gebiete mit hohem Naturschutzwert gelten. Dazu gehören vor allem natürliche Ökosysteme, wie z.B. Primärwälder oder Feuchtgebiete, artenreiche Grasländer oder Savannen. Diese Ausschlussflächen müssen vor dem Anbau identifiziert werden.

Anbausysteme für Energiepflanzen sollten in die Landschaft eingebettet sein (Konnektivität mit Schutzgebietssystemen, Erhaltung von Landschaftsvielfalt und Agrobiodiversität, Ausweisung ungenutzter Teilflächen). Beim Anbau von Energiepflanzen ist daher für ausreichende Pufferzonen zu Schutzgebieten bzw. Flächen mit hohem Naturschutzwert zu sorgen. In besonderen Fällen kann die Nutzung von Biomasse aus Schutzgebieten oder Gebieten mit hohem Naturschutzwert mit dem Schutzzweck vereinbar sein (Kap. 5.4.1). Vor der Nutzung potenziell invasiver, gebietsfremder Arten müssen die ökologischen Risiken geprüft werden (Kasten 5.4-2). Zur effektiven Überprüfung von Landnutzung und Landnutzungsänderungen sollte ein globales satellitengestütztes Landnutzungskataster geschaffen werden (Kap. 12.6).

Bodenqualität erhalten

Es dürfen nur Bioenergieträger genutzt werden, für die nachweislich beim Anbau der Rohstoffe weder die Bodenfunktionen noch die Bodenfruchtbarkeit langfristig (über 300–500 Jahre) geschwächt wird

(z.B. durch Erosion, Versalzung, Verdichtung oder Ausmagerung; Kap. 3.1.3). Die verwendeten nachwachsenden Rohstoffe müssen die Anforderungen erfüllen, die sich aus den für die Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft jeweils national oder regional (z.B. auf EU-Ebene) geltenden Vorschriften ergeben (z.B. bezüglich bedarfsgerechter Düngung, Beschränkung des Einsatzes von Pestiziden, Vermeidung des Sedimenteintrags in benachbarte Ökosysteme). Bei der Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen für energetische Zwecke muss nachgewiesen werden, dass ein ausreichender Teil der Reststoffe zur Erhaltung der Nährstoffkreisläufe und zur Humusbildung auf den Feldern verbleibt.

Waldreststoffe nachhaltig nutzen

Waldreststoffe, die für energetische Zwecke eingesetzt werden, müssen aus einem nachhaltig bewirtschafteten Wald stammen. Zudem muss nachgewiesen werden, dass bei ihrer Gewinnung ausreichende Totholzanteile auf dem Waldboden zur Erhaltung der Nährstoffkreisläufe verbleiben und die biologische Vielfalt des Waldökosystems erhalten bleibt.

Wasser nachhaltig managen

Beim Anbau von nachwachsenden Rohstoffen ist sicherzustellen, dass keine wesentliche Verschlechterung der Wasserqualität und des Wasserhaushalts sowie keine Übernutzung der Grundwasserressourcen eintreten. Es sind die Anforderungen zu erfüllen, die sich bezüglich des Gewässerschutzes aus den für die Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft jeweils national oder regional (z.B. auf EU-Ebene) geltenden Vorschriften ergeben.

Unerwünschte Folgen von gentechnisch veränderten Organismen vermeiden

*Gentechnisch veränderte Organismen (*GVO) dürfen nur verwendet werden, wenn die Ausbreitung der veränderten Gene in wildlebenden Pflanzen verhindert werden kann, Vermischungen bzw. Einträge in die Lebens- und Futtermittelkette ausgeschlossen und Vorteile anhand statistisch abgesicherter Daten nachgewiesen werden können (z.B. verbesserte Produktivität, verminderte Umweltwirkungen). Prinzipiell müssen GVO nationalen und internationalen Biosicherheitsstandards entsprechen. Als international gültige rechtliche Grundlage hierfür dient das Cartagena-Protokoll über biologische Sicherheit im Rahmen der Biodiversitätskonvention.

Grundlegende Sozialstandards beachten

In die Mindestanforderungen für Bioenergieträger sollten außerdem auch einzelne grundlegende ILO-Arbeitsnormen eingehen. Insbesondere sollten ein Verbot von Zwangs- und Kinderarbeit (im Sinne der ILO-Übereinkommen 29, 105, 138 und 182) sowie Anforderungen an einen ausreichenden Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz Berücksichtigung finden. Zusätzlich zu den in erster Linie ökologisch motivierten Nachhaltigkeitskriterien muss dadurch sichergestellt werden, dass die Produktion von Biomasse nicht unter Verletzung elementarer Sozialstandards erfolgt.

Da Kriterien zu den Arbeitsbedingungen häufig nur mit relativ hohem Aufwand und unter Umkehrung der Beweislast geprüft werden können, beschränkt sich der WBGU bei seinem Vorschlag für einen Mindeststandard aus pragmatischen Gründen auf wenige Kernanliegen. Weitere Anforderungen an die Arbeitsbedingungen, die Fairness in Geschäftsbeziehungen und bezüglich der Beachtung von Landrechten sollten jedoch bei einer expliziten Förderung der Rohstofferzeugung aus Biomasse gestellt werden (Kap. 10.3.1.2).

Wie erwähnt wird Ernährungssicherheit innerhalb des Mindeststandards des WBGU nicht direkt angesprochen, da Wirkungen der Bioenergieproduktion auf die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln nicht auf Ebene des einzelnen Betriebes nachvollzogen werden können. Dennoch findet die Konkurrenz zwischen Bioenergieanbau und Ernährungssicherheit bei der Bewertung von indirekten Landnutzungsänderungen (Kasten 10.3-1) im Mindeststandard Berücksichtigung. Eine Beobachtungs- und Berichtspflicht zur Ernährungssicherheit bei der Bewertung von Bioenergie-Programmen und -Projekten auf Länderebene ist allerdings sinnvoll.

Es ist wichtig, dass die für den Mindeststandard empfohlenen Prinzipien in einem nächsten Schritt in möglichst klare und eindeutig überprüfbare Kriterien übersetzt werden. Bei der weiteren Konkretisierung müssen gegebenenfalls rohstoff- und länderspezifische Besonderheiten in den Anbausystemen berücksichtigt werden. Eine gewisse Flexibilität in der nationalen Auslegung der Kriterien würde auch die Kompatibilität mit WTO-Recht verbessern (Fehrenbach et al., 2008).

Innerhalb Deutschlands und der Europäischen Union sind die Kriterien insbesondere mit den Anforderungen an die gute fachliche Praxis bzw. den Cross Compliance-Regelungen abzustimmen. Bei Gesetzesänderungen bezüglich der Anforderungen an die landwirtschaftliche Praxis in Deutschland und der EU sollten die Nachhaltigkeitsstandards für Bioenergieträger angepasst werden. Umgekehrt sollten auch die Regeln der guten fachlichen Praxis und der Cross Compliance im Zuge der Diskussion über Nachhaltigkeitskriterien für Biokraftstoffe und andere Bioenergieträger auf den Prüfstand genommen werden und ggfs. um zusätzliche strengere Kriterien erweitert werden. Insbesondere sollten sie im

Zuge der Überprüfung der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP) in den Jahren 2008 und 2009 um Klimaschutzaspekte ergänzt werden (Kap. 12.1). Damit würde erreicht, dass Bioenergieprodukte aus Europa automatisch hohe Umwelt- und Klimaschutzanforderungen erfüllen.

10.3.1.2 Förderkriterien speziell für die Biomasseerzeugung

Die Einhaltung des Mindeststandards sollte eine Grundvoraussetzung für die Produktion von Bioenergieträgern sein. Unter der Voraussetzung einer effektiven Umsetzung werden damit die unter ökologischen und sozialen Aspekten als besonders ungünstig eingestuften Bioenergieträger aus dem Markt ausgeschlossen. Nur wenn durch die Bioenergienutzung besonders hohe Klimaschutzwirkungen erzielt werden können, sollte diese auch aktiv gefördert werden. Eine Voraussetzung für die Förderung sollte sein, dass durch den Einsatz der Bioenergie unter Berücksichtigung direkter und indirekter Landnutzungsänderungen eine Reduktion der Lebenszyklustreibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilen Energieträgern von mindestens 60 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse erreicht werden kann (Kap. 10.7.2). Darüber hinaus kann die Förderung der Erzeugung von Biomasserohstoffen nach zusätzlich definierten Kriterien erwogen werden. Gefördert werden sollte dann, wenn durch den Anbau von Energiepflanzen und der Bereitstellung anderer Biomasserohstoffe nachweisliche Verbesserungen in Form reduzierter Energiearmut oder erhöhten Klima-, Biodiversitäts- oder Bodenschutzes erzielt werden. Letzteres ist bei der Bioenergienutzung insbesondere der Fall, wenn direkte wie indirekte Landnutzungsänderungen vermieden werden können. Daher erscheint vor allem die Nutzung von biogenen Abfall- und Reststoffen sowie der Anbau von Energiepflanzen auf Flächen, von denen nur wenig oder keine vorherige Nutzung (z.B. Nahrungs-, Futtermittelanbau) verdrängt wird (vor allem marginales Land), als besonders förderungswürdig.

Kriterien für die Förderung der Nutzung biogener Abfälle und Reststoffe

Die Nutzung von Bioenergie aus biogenen Abfällen (einschließlich aus Kaskadennutzung) und Reststoffen sollte grundsätzlich gefördert werden. Voraussetzung für die Förderungswürdigkeit von Reststoffen aus Land- oder Forstwirtschaft sollte die Nachhaltigkeit in Bezug auf die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit sein. Bei der Förderung der Abfallnutzung sollte eine Analyse der gegenwärtigen Nutzung sicherstellen, dass keine Verdrängungseffekte entstehen, etwa wenn biogener Abfall bisher stofflich genutzt wurde und ein Umlenken des Abfalls in die energetische Nutzung eine unerwünschte Nachfrage nach anderen Rohstoffen auslösen würde.

Kriterien für die Förderung des Anbaus von Energiepflanzen

Über den Mindeststandard hinaus sollten für die Förderungswürdigkeit des Anbaus von Energiepflanzen die folgenden Voraussetzungen gesamthaft erfüllt sein:

- *Die Kohlenstoffaufnahme auf der Fläche erhöht sich durch die Nutzung:* Es sollten Anbausysteme mit mehrjährigen Energiepflanzen gefördert werden, bei denen die ganze oberirdische Biomasse (Gras, Holz) oder die Früchte mehrjähriger Ölpflanzen als Rohstoffe genutzt werden. Da die unterirdische Biomasse dieser Energiepflanzen nicht geerntet wird, wird in der Regel Kohlenstoff in den Boden eingetragen, was die Bodenfruchtbarkeit verbessert.
- *Die Treibhausgasemissionen beim Anbau werden gering gehalten:* Auf den Umbruch und die regelmäßige Bodenbearbeitung sollte weitgehend verzichtet werden und es sollte auf ganzjährige Bodendeckung geachtet werden. Der Einsatz von Primärenergie (und damit Treibhausgasemissionen) im Anbausystem sollte nachweislich vermindert werden. Zum Vergleich sollte die in der jeweiligen Region übliche Nahrungs- oder Futtermittelproduktion dienen. Biogener Dünger sollte gegenüber synthetischem Dünger (vor allem N-Dünger) vorgezogen werden (z.B. Mist, Gülle, Mulch, aber auch Gründüngung durch Unter- und Zwischenkulturen oder Ascherückführung). Es sollte nicht zur Auswaschung von Nährstoffen von der Fläche kommen.
- *Es wird integrierter Pflanzenschutz angewendet:* Auf den Einsatz von Pestiziden sollte durch Anwendung integrierten Pflanzenschutzes so weit wie möglich verzichtet werden. Das bedeutet u.a. den bevorzugten Einsatz von biologischen und mechanischen Schutzmaßnahmen und die Wahl resistenter Sorten.
- *Die Wassernutzung erfolgt nachhaltig:* Wird Bewässerung eingesetzt, sollte dies nur auf Basis eines effektiven integrierten Wasserressourcenmanagementplans erfolgen. Der Plan sollte für eine Dauer von mindestens 15–20 Jahren umgesetzt werden. Versalzung und Staunässe sind zu vermeiden.
- *Die biologische Vielfalt wird erhalten:* Es sollten Anbausysteme mit möglichst großer Diversität (Sorten, Arten, Fruchtfolgen, Landschaft) gefördert werden. Der Anbau potenziell invasiver Arten ist zu vermeiden. Vor der Nutzung von mar-

ginalem Land sollte eine Bewertung des Naturschutzwerts erfolgen.

- *Die Produktion erfolgt unter guten Arbeitsbedingungen:* Es sollten nur Rohstoffe gefördert werden, für die der Produzent einen Nachweis erbringen kann, dass in der Produktion über die Einhaltung der elementarsten ILO-Kernarbeitsnormen hinaus Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen vorgenommen werden. Insbesondere sollten existenzsichernde Löhne gezahlt werden, faire Arbeitszeiten vereinbart werden und weitergehende Maßnahmen für die Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz nachgewiesen werden können.
- *Rohstoffe werden unter fairen Bedingungen erworben und Landrechte und Interessen der lokalen Bevölkerung werden geachtet:* Erfolgt die Erzeugung von Biomasserohstoffen im Rahmen von Vertragslandwirtschaft, sollte der jeweilige Abnehmer außerdem nachweisen können, dass alle Rohstoffe gemäß den branchenüblichen Preisen erworben wurden und dass er zu den lokalen Rohstoffproduzenten zuverlässige und transparente Geschäftsbeziehungen pflegt. Insbesondere in Entwicklungsländern sollten die Interessen der lokalen und indigenen Bevölkerung sowie der Landlosen berücksichtigt werden. Es muss ein Nachweis erfolgen, dass die Eigentums- und Besitzrechte an Land geachtet werden und die Anbauflächen rechtmäßig erworben wurden.

Es wird davon ausgegangen, dass diese Kriterien vor allem beim Anbau von Energiepflanzen auf marginalem Land eingehalten werden können, weshalb der WBGU dies als besonders förderungswürdig erachtet.

Die Modernisierung der netzunabhängigen bzw. traditionellen Nutzung von Bioenergie kann dazu besonders im ländlichen Raum von Entwicklungsländern einen wertvollen Beitrag zur Überwindung der Energiearmut leisten. Hier erscheint dem WBGU eine Förderung von bioenergiebasierten Projekten auch dann gerechtfertigt, wenn die Klimaschutz- und Förderkriterien nicht voll erfüllt werden.

10.3.2 Ansätze zur Implementierung von Standards für Bioenergieträger

Die Umsetzung des in Kapitel 10.3.1 beschriebenen Mindeststandards für Bioenergieträger kann prinzipiell in unterschiedlicher Weise erfolgen. Einerseits kann er von einem Akteur (Private, Staat, Europäische Union) unilateral eingeführt werden, andererseits kann er zwischen mehreren Parteien auf bi- und multilateraler Ebene verhandelt werden. Ferner kann er mit unterschiedlicher rechtlicher Verbindlichkeit eingeführt werden: So ist auf nationaler wie auch internationaler Ebene sowohl eine rechtlich verbindliche Normierung als auch eine Statuierung im Sinne freiwilliger Leitlinien bzw. allgemeiner Prinzipien denkbar. Weiter kann ein Mindeststandard auch bei der Finanzierung von Bioenergie-Projekten von multilateralen Entwicklungsbanken und internationalen Finanzierungsinstitutionen herangezogen werden.

Der WBGU empfiehlt den europäischen Staaten angesichts der hohen Unsicherheiten und Risiken bei der Produktion und Nutzung von Bioenergie die verpflichtende Einführung des Mindeststandards zunächst unilateral auf Ebene der Europäischen Union, aber idealerweise auch darüber hinaus im Rahmen von bi- und multilateralen Abkommen zwischen wichtigen Konsumenten- und Produzentenländern von Bioenergie. Bestehende freiwillige Standards können dabei teilweise als Referenz dienen und bestehende freiwillige Zertifizierungssysteme bei der Verifizierung verpflichtender Mindeststandards herangezogen werden. Ausschließlich auf freiwilligen Standards basierende Regulierungen hält der WBGU im Falle der Bioenergieproduktion für nicht ausreichend, da sie die Nachhaltigkeit bei der Bioenergieproduktion nicht großflächig und mit der gewünschten Tiefenwirkung sicherstellen können.

10.3.2.1 Standards privater, staatlicher und supranationaler Organisationen

Rechtlich verbindliche Mindeststandards und ihre Umsetzung

Die Einführung eines gesetzlichen Mindeststandards ist die verbindlichste Form der Standardsetzung. Er definiert Grenz- oder Schwellenwerte und Anforderungen an den Herstellungsprozess, deren Nichteinhaltung zu einer Sonderbehandlung des jeweiligen Produktes führt, z.B. zu einem Einfuhr- oder Nutzungsverbot. Eine solche generelle gesetzliche Pflicht zur Einhaltung von Nachhaltigkeitskriterien für alle Arten von Bioenergieträgern ist soweit ersichtlich bisher in keinem Land vorgesehen. Entsprechende Pläne der Europäischen Union sowie einzelner europäischer Staaten beziehen sich in erster Linie auf die Identifizierung von flüssigen Biotreibstoffen, welche sich für eine Förderung qualifizieren. So möchte die Europäische Union im Rahmen ihrer Klimaschutzstrategie einen zunehmenden Anteil fossiler Kraftstoffe durch Biokraftstoffe ersetzen und die Erfüllung verpflichtender Mindeststandards als Voraussetzung für die Förderung in den Mitgliedsstaaten

Kasten 10.3-2

Vom Rat der Europäischen Union vorgeschlagene Nachhaltigkeitskriterien für flüssige Biokraftstoffe im Rahmen der geplanten EU-Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien (Stand: September 2008)

1) THG-Reduktion
Die THG-Einsparung aus der Nutzung von Biokraftstoffen soll im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen bei mindestens 35 % liegen, ab dem 1. Januar 2017 bei mindestens 50 %. Biokraftstoffe aus Rohstoffen, die von restaurierten degradierten Flächen stammen, sollen einen Bonus erhalten, der zu höherem THG-Ausstoß berechtigt.

2) Biodiversitätsschutz
Biokraftstoffe sollen nicht aus Rohstoffen hergestellt werden, die in Gebieten mit hohem Wert für die Biodiversität gewonnen wurden, insbesondere in Gebieten, die vor dem 1. Januar 2008 Primärwälder, Schutzgebiete oder biodiverses Grasland waren.

3) Erhalt von Kohlenstoffspeichern
Biokraftstoffe sollen nicht aus Rohstoffen hergestellt werden, die in Gebieten mit großen Kohlenstoffspeichern gewonnen wurden, insbesondere in Gebieten, die vor dem 1. Januar 2008 Feuchtgebiete oder Waldflächen mit einer Ausdehnung von mehr als 1 ha (Baumhöhe > 5m; Kronenschluss > 30 %) waren.

4) Kriterien für den landwirtschaftlichen Anbau
Rohstoffe, die innerhalb der Europäischen Union produziert werden, müssen den Anforderungen genügen, die für den Erhalt von Direktzahlungen im Rahmen der EU-Agrarpolitik eingehalten werden müssen (Cross Compliance). Zur nationalen Umsetzung der in 1)-3) genannten Nachhaltigkeitskriterien sowie zu den Anbaubedingungen für Biomasserohstoffe in Mitgliedstaaten und Drittländern (u.a. Wasser- und Bodenschutz, Luftemissionen, Einsatz von Agrochemikalien) wird die Kommission dem Parlament und dem Rat alle zwei Jahre – erstmals im Jahr 2012 – einen Bericht vorlegen. Die Möglichkeiten zur Einführung verbindlicher Kriterien zum Schutz von Boden, Wasser und Luft soll bis 2015 von der Kommission geprüft werden.

5) Soziale Kriterien
Die unter 4) genannte Berichtspflicht der Kommission soll sich ebenso auf die nationale Umetzung der ILO-Kernarbeitsnormen in den Mitgliedsstaaten und Produktionsländern von Biomasserohstoffen erstrecken wie auch auf die sozioökonomischen Folgen der Biomassenutzung im Allgemeinen. Insbesondere soll die Kommission in ihren Berichten zur Entwicklung der Nahrungsmittelpreise und möglichen Gefahren für die Ernährungssicherheit Stellung nehmen. Auch die Einhaltung von Landrechten und andere Entwicklungsfragen sollen thematisiert werden.

Die oben genannten Nachhaltigkeitskriterien beziehen sich zunächst auf alle flüssigen Biobrennstoffe. Eine Ausweitung auf andere Biomassenutzungen soll die Kommission bis zum Jahr 2010 prüfen. Für die Etablierung umfangreicherer und strengerer Nachhaltigkeitskriterien sollen bi- und multilaterale Abkommen mit Produzentenländern sowie freiwillige Standards unterstützt werden (Rat der Europäischen Union, 2008).

Für die Zertifizierung möchte die EU verschiedene Zertifizierungssysteme anerkennen, sofern deren Prüfkriterien die Einhaltung der Anforderungen aus der Verordnung gewährleisten. Dieses Vorgehen, auch als Metastandard-Ansatz bezeichnet, ermöglicht den Nachweis über die Einhaltung eines Standards durch Nachweise über die Einhaltung mehrerer Teilstandards, deren Einzelkriterien zusammen die Kriterien des Metastandards vollständig abdecken.

durch Anrechnung an nationale Beimischquoten oder durch Steuererleichterungen einfordern (Kap. 4.1.2). Die dafür geforderten Nachhaltigkeitskriterien wurden im Entwurf für die EU-Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien formuliert (Kasten 10.3-2).

Der im Kasten beschriebene Kriterien-Vorschlag (Rat der Europäischen Union, 2008) deckt damit viele Bereiche ab, die auch in den Mindestanforderungen des WBGU an einen Standard für Bioenergieträger (Kap. 10.3.1) angesprochen werden. Damit kann der Entwurf insgesamt als Schritt in die richtige Richtung gewertet werden. Allerdings bleibt die geplante EU-Regelung aufgrund der Unverbindlichkeit der Kriterien zu lokalen Umweltwirkungen und Arbeitsbedingungen hinter den vom WBGU als notwendig erachteten Prinzipien zurück. Um wirksam zu sein, sollte der Entwurf verbindliche Kriterien bezüglich der Auswirkungen des Rohstoffanbaus auf Böden und Gewässer sowie im Hinblick auf einzelne ILO-Kernarbeitsnormen (insbesondere Zwangs- und Kinderarbeit) beinhalten. Zudem ist der Vorschlag um die vom WBGU empfohlenen Methoden zur Berücksichtigung indirekter Landnutzungsänderungen (Kap. 7.3) zu erweitern. Auch die Verwendung genveränderter Organismen (GVO) sollte bestimmten Kriterien unterliegen. Nur dann kann eine ökologische und soziale Nachhaltigkeit von Bioenergie glaubhaft sichergestellt werden. Zu begrüßen sind die von der EU geplante Bevorzugung von Biokraftstoffen aus biogenen Abfall-und Reststoffen sowie der geplante Bonus für die Restaurierung degradierten Flächen.

Aus Sicht des WBGU sollte die Europäische Union jedoch weiter gehen und alle innerhalb der EU energetisch genutzten Biomasseprodukte der Einhaltung der Mindeststandards unterwerfen. Eine explizite Förderung des Energiepflanzenanbaus und der Bereitstellung anderer Biomasserohstoffen sollte wiederum nur erfolgen, wenn dabei anspruchsvolleren Förderkriterien (Kap. 10.3.1.2) erfüllt werden und daraus ein Beitrag zur nachhaltigen Landnutzung oder zur Überwindung der Energiearmut erwächst. Die Europäische Kommission hat zur Frage der Ausweitung des Nachhaltigkeitsstandards auf alle Arten von Bioenergie im Juli 2008 einen öffentlichen Kon-

sultationsprozess gestartet, in dem auch die Einführung von Mindeststandards als allgemeine Voraussetzung für das Inverkehrbringen von Bioenergieprodukten zur Diskussion gestellt wird. Diese ist die vom WBGU favorisierte Option.

Werden rechtlich verbindlichen Mindeststandards für Bioenergieträger im Sinne des WBGU vorgeschrieben, so muss innerhalb der EU ein entsprechendes international anwendbares Zertifizierungssystem entwickelt werden, damit die Einhaltung der Standards von den Betrieben innerhalb der EU, aber auch im Ausland, dokumentiert werden kann. Ein solches Zertifizierungssystem sollte von vorne herein so aufgebaut werden, dass mittel- bis langfristig auch andere Formen der Biomassenutzung integriert werden können (Kap. 10.3.1). Dies wird etwa in dem vom BMELV in Auftrag gegebenen Zertifizierungssystem „International Sustainability and Carbon Certification“ (ISCC) berücksichtigt, welches vom Beratungsunternehmen MEO Consulting Team entwickelt wurde. Das ISCC erfasst alle Arten von Bioenergieträgern und ist so konzipiert, dass langfristig alle Biomassearten darunter gefasst werden können. Je nach Pflanzen und Regionen wurden unterschiedliche Mindeststandards und THG-Bilanzen (Default-Werte) erarbeitet, die der Zertifizierung zugrunde gelegt werden sollen. Dabei wird der „Metastandard“-Ansatz verfolgt, d.h. bestehende Zertifizierungssysteme, etwa für Holz und Nahrungsmittel, werden für die Validierung der Einhaltung der Kriterien anerkannt (Meó Corporate Development, 2008). Der WBGU unterstützt die Herangehensweise des ISCC. Weiter empfiehlt der WBGU, wie im EU-Vorschlag vorgesehen, die Zertifizierung der Produkte nach dem „Mass-balance“-System. Im Gegensatz zum ebenfalls diskutierten „Book-and-claim“-System ist beim „Mass-balance“-System eine Rückverfolgbarkeit der Warenflüsse möglich, was das System weniger betrugsanfällig macht.

Für die Umsetzung eines solchen Zertifizierungssystems müssten unabhängige Zertifizierungsinstitutionen geschaffen werden sowie Kontrollorgane eingerichtet werden, die den Markt für Bioenergie-Zertifizierung überwachen und die Einhaltung der Standards national und international durchsetzen sowie die Nichteinhaltung sanktionieren können. Während einem einzelnen Staat bzw. der EU die Funktion als standardsetzende Institution und Kontrollinstitution zukommt, kann die Schaffung von geeigneten Zertifizierungssystemen und die Durchführung der Zertifizierungen in Zusammenarbeit mit Marktakteuren geschehen. Eine möglichst weitgehende Auslagerung der Zertifizierung an private, akkreditierte Zertifizierungsinstitutionen würde die Kosten eines solchen Systems für die öffentliche Hand reduzieren. Die stichpunktartige Kontrolle der Einhaltung der Standards müsste dennoch durch staatliche Stellen sichergestellt werden. Entwicklungs- und Schwellenländer sollten bei der Einrichtung von nationalen Kontrollstellen technisch und finanziell unterstützt werden.

Freiwillige Standards

Von den bereits etablierten freiwilligen Standards und Zertifizierungssystemen für Biomasse und Energieprodukte könnten einige aufgrund ihrer inhaltlichen Ausrichtung, ihrer weltweiten Anwendbarkeit und ihrer globalen Akzeptanz als Referenzsystem für einen Standard für Bioenergieträger dienen und möglicherweise auch bei der Zertifizierung als Nachweis über die Einhaltung der Zertifizierungskriterien herangezogen werden. Grundsätzlich haben freiwillige Standards und Zertifizierungssysteme gegenüber einem verbindlichen Mindeststandard den Vorteil, dass sie auch anspruchsvollere Anforderungen enthalten können, da grundsätzlich aufgrund der Freiwilligkeit mit einer höheren Akzeptanz bei den betroffenen Marktakteuren zu rechnen ist und zudem die Frage der Vereinbarkeit mit dem internationalen Handelsrecht günstiger zu beurteilen ist (Kap. 10.3.4).

Freiwillige Standards sind für Produzenten dann attraktiv, wenn zusätzliche Aufwendungen für die Einhaltung der Standards sowie für die Durchführung der Zertifizierung durch höhere Einnahmen aus dem Verkauf der zertifizierten Produkte kompensiert werden. Dies kann nur dann der Fall sein, wenn die Konsumenten eine Zahlungsbereitschaft für Bioenergieträger aus zertifizierter Produktion aufweisen, so dass die Produzenten eine Preisprämie für zertifizierte Produkte verlangen können. Die Höhe der Zahlungsbereitschaft der Konsumenten bestimmt die Höhe der Nachfrage nach zertifizierten Produkten und somit den Marktanteil zertifizierter Bioenergieträger. Bei entsprechender Sensibilisierung der Konsumenten für mögliche negative Umwelt- und Sozialwirkungen bei der Herstellung von Bioenergieträgern könnte ein Nachfragesog für nachhaltig produzierte Bioenergieträger durch die gesamte Handelskette ausgelöst werden.

Bei der Einschätzung der Wirksamkeit freiwilliger Zertifizierungssysteme im Bioenergiesektor hilft der Blick auf bestehende Zertifizierungssysteme für Holz, Nahrungsmittel und Energieprodukte (Tab. 10.3-1). Es zeigt sich, dass staatliche Regulierung und Anreizsysteme im Markt für zertifizierte erneuerbare Energien eine weit wichtigere Rolle spielen als etwa im Markt für öko-zertifizierte Nahrungsmittel, weshalb Erfahrungen bei der Zertifizierung von Nahrungsmitteln nicht ohne weiteres auf den Bioenergiesektor übertragen werden können. Im Unterschied zu öko-zertifizierten Nahrungsmitteln, die

Tabelle 10.3-1
Ausgewählte Beispiele für bestehende und sich in Entwicklung befindliche Standards und Zertifizierungssysteme für Biomasseerzeugnisse nach Sektoren.
Quellen: van Dam et al., 2006; Lewandowski und Faaij, 2006; Zarrilli, 2006; Fritsche et al., 2006; Fehrenbach, 2007; Paul, 2008; SEKAB, 2008; Nordic Ecolabel, 2008; MDA, 2008

	Freiwillige Standards und Zertifizierungssysteme auf internationaler Ebene	**Freiwillige Standards und Zertifizierungssysteme auf nationaler und EU-Ebene**
Forstwirtschaft	Forest Stewardship Council (FSC) Principles and Criteria, Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC), Richtlinien der International Tropical Timber Organization (ITTO)	MY: Zertifizierung des Malaysian Timber Certification Council (MTCC); ID: Zertifizierung des Indonesian Ecolabelling Institute (LEI)
Landwirtschaft	International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM), Good Agricultural Practices der Euro-Retailer-Produce-Working Group (GlobalGAP, ehemals EurepGAP), Sustainable Agriculture Network/Rainforest Alliance (SAN/RA), Generic Fairtrade Standards for Small Farmer's Organizations der Fairtrade Labelling Organizations International (FLO)	DE: VDLUFA/USL-Zertifikat; EU: GAP-Auflagenbindung (Cross Compliance)
Nahrungsmittel	Standards der Fairtrade Labelling Organizations International (FLO), Utz Certified Codes of Conduct (Kaffee), Max Havelaar	DE: Fair Trade-Siegel, Bioland-Label; CH: BioSuisse-Label, Max Havelaar-Label; US: Organic-Label; EU: EU-Biosiegel
Energieprodukte		EU: Standard des European Green Electricity Network (EUGENE Standard); US: Green-e; NL: Green Gold-Label; BE/NL/LU: Electrabel-Label; DE: OK Power-Label, Grüner-Strom-Label; FI: Ecoenergia-Label; CH: Naturemade-Label
Industrie allgemein	SA 8000 Standard der Social Accountability International (SAI), Ethical Trading Initiative (ETI) Base Code; Standards der International Labour Organization (ILO); Standards der Fairtrade Labelling Organizations International (FLO),	EU: Europäisches Umweltzeichen; US/EU: Energy Star
Bioenergieträger *(zum Teil in Entwicklung)*	Round Table on Sustainable Palmoil (RSPO), Roundtable on Responsible Soy (RTRS), Better Management Practices der Better Sugarcane Initiative (BSI), Roundtable on Sustainable Biofuels der ETH Lausanne (RSB)	BR: „Social Fuel"-Siegel, DE: International Sustainability and Carbon Certification (ISCC) SE: „Verified Sustainable Ethanol Initiative" der Firma SEKAB; Nordic Ecolabel („The Swan") für Biokraftstoffe; EU: Europäischer Normungsprozess CEN/TC/383 „Nachhaltigkeitskriterien für Biomasse"

auch das Gesundheitsbewusstsein der Verbraucher ansprechen, kann eine freiwillige Zertifizierung von Energieprodukten nur bei einem flächendeckend hohen Umweltbewusstsein der Verbraucher signifikante Marktanteile gewinnen. Die Realität zeigt bisher, dass das vergleichbare Produkt öko-zertifizierter Strom in den meisten Ländern nur geringe Marktanteile aufweist (Willstedt und Bürger, 2006), was einen Anhaltspunkt für die Zahlungsbereitschaft der Konsumenten für zertifizierte Bioenergie gibt. Zum Konsumentenverhalten bei freiwilligen Standards und Zertifizierungen im Bioenergiebereich (Akzeptanz, Informationsbedürfnisse) sieht der WBGU dennoch Forschungsbedarf (Kap. 11.4.3).

Es ist zudem nicht zu erwarten, dass bei den Energie- und Kraftstofferzeugern eine ausreichende

Bereitschaft vorliegt, sich freiwillig einem strengen Nachhaltigkeitsstandard zu unterwerfen. Im Forstbereich wird beobachtet, dass mit zunehmender Strenge der Kriterien der Marktanteil eines freiwilligen Zertifizierungssystems tendenziell abnimmt (Fehrenbach et al., 2008). Weniger strenge freiwillige Systeme, wie etwa PEFC im Forstbereich oder GlobalGAP bei Nahrungsmitteln, finden in der Industrie möglicherweise Zuspruch, können aber in einem stark wachsenden Markt für Bioenergie nicht die vom WBGU als notwendig erachtete Tiefenwirkung erreichen.

Deshalb ist davon auszugehen, dass allein durch freiwillige Standards und Zertifizierungssysteme die Nachhaltigkeit der Bioenergienutzung nicht gewährleistet werden kann. Dennoch können – wie im Folgenden gezeigt wird – freiwillige Systeme im Rahmen verpflichtender Mindeststandards teilweise als Referenzsysteme verwendet werden. Da der Markt für Bioenergieträger eng mit anderen Biomassenutzungen wie z.B. Biomasse als Nahrungs- oder Futtermittel sowie als Rohstoff in der Industrie verwoben ist, für die teilweise bereits freiwillige nationale und internationale Zeritifizierungssysteme bestehen (Tab. 10.3-1), sollten mögliche Synergien von Zertifizierungssystemen für Bioenergieträger mit bestehenden Zertifizierungen für andere Biomassenutzungen ausgeschöpft werden.

In Tabelle 10.3-1 sind ausgewählte Beispiele für bereits bestehende Standards und Zertifizierungssysteme für verschiedene Produktkategorien sowie sich in Entwicklung befindende Standards für Bioenergieträger im Speziellen aufgelistet:

Von den bereits etablierten Standards und Zertifizierungssystemen für Biomasse außerhalb der energetischen Nutzung könnten einige aufgrund ihrer inhaltlichen Ausrichtung, ihrer weltweiten Anwendbarkeit und ihrer globalen Akzeptanz als Referenzsystem für einen Standard für Bioenergieträger dienen und möglicherweise auch bei der Zertifizierung als Nachweis über die Einhaltung der Zertifizierungskriterien herangezogen werden. Im Forstbereich sollte sich ein Bioenergiestandard an dem des Forest Stewardship Council (FSC) messen lassen. Dieser stellt derzeit neben dem weniger anspruchsvollen PEFC-Standard den wichtigsten internationalen Standard für nachhaltiges Forstmanagement dar (Kaiser, 2008). In vielen anderen Standards wird er als Referenzstandard anerkannt (z.B. Naturemade-Label, „ok-Power"-Label, „Green Gold"-Label). Im Agrarbereich könnte der „Sustainable Agriculture Standard" des Sustainable Agriculture Network der Rainforest Alliance (SAN/RA) bei der Konkretisierung und Umsetzung des vom WBGU empfohlenen Mindeststandards herangezogen werden. Die speziell für kleine landwirtschaftliche Betriebe entwickelten Generic Fairtrade Standards for Small Farmer's Organizations der Fairtrade Labelling Organizations International (FLO) könnten bei der Zertifizierung von Kleinbetrieben in Entwicklungsländern als Beispiel dienen. Bei den Sozialstandards sollten die von der International Labour Organization (ILO) definierten international anerkannten Kernarbeitsnormen zugrunde gelegt werden, wobei zusätzliche Aspekte des adäquaten Arbeitsschutzes integriert werden sollten. Umfassendere Sozialkriterien, die bei einer Förderung der Erzeugung von Biomasserohstoffen erfüllt sein sollten, finden sich im Standard der Social Accountability 8000 (SA 8000).

Speziell für grünen Strom existieren in einigen europäischen Ländern auf nationaler Ebene bereits Kennzeichnungen und Zertifizierungssysteme, wie z.B. das „Green Gold"-Label (NL), das Electrabel-Label (BE, NL, LU) das Ecoenergia-Label (FI), das „Grüner Strom"-Label (DE) oder das „ok power"-Label (DE) (Zarrilli, 2006). Diese regeln meistens jedoch in erster Linie die Herkunft der erneuerbaren Energie und die Zusätzlichkeit im Gesamtstromangebot. In den wenigsten Fällen beziehen diese Zertifizierungssysteme ausdrücklich Nachhaltigkeitskriterien mit ein. Das deutsche „ok-Power"-Label und das niederländische „Green Gold"-Label bilden eine Ausnahme, indem sie für Biomasse aus Land- und Forstwirtschaft eine entsprechende Nachhaltigkeitszertifizierung gemäß Bio- oder FSC-Standard bzw. GlobalGAP-Standard fordern.

Die Europäische Union hat in der Vergangenheit Umweltstandards für verschiedene Produktkategorien etabliert, wie z.B. das EU-Bio-Siegel für Nahrungsmittel sowie das EU-Umweltzeichen für sonstige Industriegüter. Standards für die gute landwirtschaftliche Praxis sind in der Auflagenbindung (Cross Compliance) der gemeinsamen EU-Agrarpolitik (GAP) verankert und geben bereits grundlegende Standards für die Landnutzung innerhalb der EU vor.

Auch wichtige Exportländer von Bioenergieträgern wie Indonesien und Malaysia haben Standards und Zertifizierungssysteme zur nachhaltigen Land- und Forstwirtschaft entwickelt. So vergeben der „Malaysian Timber Certification Council" und das "Indonesian Ecolabelling Institute" Zertifikate für nachhaltige Forstwirtschaft auf freiwilliger Basis.

Dabei ist zu beachten, dass die hier genannten Standards und Zertifizierungssysteme Kriterien betreffend den Schutz von natürlichen Ressourcen wie Böden, Wasser, und Artenvielfalt sowie soziale Kriterien umfassen. Keines der bestehenden Systeme enthält jedoch ein Kriterium zur Treibhausgasreduktion. Diese Anforderung stellt sich nur im spezifischen Fall der Bioenergie und muss deshalb in einem

geeigneten Standard bzw. Zertifizierungssystem neu formuliert und methodisch diskutiert werden.

Aufgrund der zunehmenden Produktion und Nutzung von Bioenergie wurden zwischenzeitlich bereits Systeme speziell für den Bioenergiesektor entwickelt, die auch Kriterien zu Treibhausgas-Emissionsreduktionen enthalten. Ein erstes privates Zertifizierungssystem für Bioethanol aus Brasilien wurde kürzlich vom schwedischen Ethanolhersteller SEKAB vorgestellt (SEKAB, 2008). Gleichzeitig entwickelte das skandinavische Ökolabel „The Swan“ Zertifizierungskriterien für Biokraftstoffe, so dass künftig auch nachhaltig produzierte Biokraftstoffe das Label tragen können, welches bisher vor allem auf Nahrungsmittel und Haushaltsprodukte anwendbar war (Nordic Ecolabel, 2008). In Deutschland wurde zur Zertifizierung von Bioenergie das System „International Sustainability and Carbon Certification“ (ISCC) entwickelt (Kap. 10.3.2.1). Es befindet sich jedoch derzeit in der Testphase und ist noch nicht operativ. Brasilien hat mit dem „Social Fuel“-Siegel im Rahmen seines Nationalen Biodieselprogramms ein Zertifizierungssystem für Biodiesel mit dem Ziel der stärkeren Einbeziehung von kleinen landwirtschaftlichen Betrieben in den Biodiesel-Produktionsprozess geschaffen, welches sich jedoch auf diesen sozialen Aspekt der Biokraftstoffproduktion beschränkt (MDA, 2008; GBEP, 2008). Parallel zur Entwicklung von Nachhaltigkeitskriterien für Biokraftstoffe im Zuge der EU-Richtlinie zur Förderung Erneuerbarer Energien (Kasten 10.3-5) hat das Europäische Komitee für Normung (CEN) den Normungsprozess CEN/TC/383 für nachhaltige Biokraftstoffe gestartet.

Wie in Tabelle 10.3-1 ersichtlich wird, sind außerdem verschiedene freiwillige Nachhaltigkeitsstandards speziell für Bioenergieträger auf internationaler Ebene gerade in Entwicklung. So haben der Roundtable on Sustainable Palmoil (RSPO), der Roundtable on Responsible Soy (RTRS) und die Better Sugarcane Initiative (BSI) rohstoffspezifische Standards erarbeitet (Doornbosch und Steenblik, 2007). Diese Standards sind jedoch mit Ausnahme des Standards des RSPO noch nicht operativ, d.h. es wurden zwar Standards entwickelt, aber noch keine entsprechenden Zertifizierungssysteme geschaffen. Die Einbindung von Rohstoffproduzenten, Banken und Investoren, Großhändlern sowie die Konsumgüterindustrie in den beschlussfassenden Gremien ist einer der Gründe, warum die genannten Multistakeholder-Initiativen teilweise umstritten sind (Fritz, 2007). Seit 2007 gibt es außerdem den Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB) der Technischen Hochschule Lausanne speziell zur Standardsetzung im Biokraftstoffbereich. Der RSB hat sich einem besonders partizipativen und transparenten Standardsetzungsprozess verschrieben, bei dem die Teilnahme grundsätzlich jedem offen steht (Maier, 2008; Kasten 10.3-3).

Schließlich haben sich angesichts der zunehmenden Nachfrage nach Bioenergie auch viele internationale Organisationen und multilaterale Initiativen mit geeigneten Standards für Bioenergieträger befasst.

Kasten 10.3-3

Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB)

Der Runde Tisch zu nachhaltigen Biotreibstoffen (RSB) ist ein multilaterales Stakeholder-Forum, das auf eine Initiative der Technischen Hochschule Lausanne zurückgeht. Das Forum bringt über 300 unterschiedliche Akteure zusammen, darunter internationale Unternehmen (z.B. Shell, Bunge), NGOs und Verbände (z.B. World Wide Fund for Nature (WWF), Vereinigung der Zuckerrohranbauer in Brasilien, Organisationen von Kleinbauern), internationale Institutionen (z.B. International Energy Agency, Forest Stewardship Council (FSC), UN-Organisationen (UNEP, FAO, UNIDO). Ziel ist es, gemeinsam (bottom-up) mit zivilgesellschaftlichen Gruppen und Experten globale Standards und ein Zertifizierungssystem für Biokraftstoffe zu erarbeiten. Als Referenz dienen dabei vor allem das FSC-Siegel, die Standards von SAN/RA, BSI, RSPO, ILO (vgl. Tabelle 10.3-1) und aktuelle Standardsetzungsprozesse für Bioenergie, u.a. der niederländischen und britischen Regierungen (RSB, 2008a, b). Der RSB folgt dabei dem ISEAL Code of Good Practice for Setting Social and Environmental Standards.

Seit Beginn der Initiative im Jahr 2007 arbeitet der RSB aktiv in vier offenen Arbeitsgruppen zu Umwelt- und Sozialstandards, zur Methodik der TGH-Erfassung und zur Implementierung von Standards. Über virtuelle Netze, Webseiten (BioenergyWiki), Telefonkonferenzen und Arbeitstagungen auf verschiedenen Kontinenten wurden stark sachorientiert Prinzipien erarbeitet. Die Vorschläge für Standards einer nachhaltigen Biokraftstoffproduktion sowie die Diskussionen dazu sind im Internet jederzeit einsehbar und können kommentiert werden. Eine abgestimmte Kriterienliste wurde im August 2008 der Öffentlichkeit zur Kommentierung unterbreitet. Eine überarbeitete Version soll im April 2009 vorliegen (RSB, 2008b).

Der RSB nimmt dadurch eine wichtige Stellung im Prozess der Formulierung von globalen Bioenergiestandards ein. Durch seine breite und offene gesellschaftliche Beteiligung genießt die Arbeit des RSB eine hohe Glaubwürdigkeit So hat z.B. im April 2008 die Interamerikanische Entwicklungsbank eine Partnerschaft mit dem RSB angekündigt, um die dort zu erarbeitenden Nachhaltigkeitskriterien in ihre Vergabepraxis zu integrieren (IDB Pressemitteilung, 05.04.2008). Wie weiter mit den erarbeiteten Standards umgegangen wird, ist derzeit offen. Es könnte daraus ein freiwilliges Zertifizierungssystem erwachsen. Die Vorschläge des RSB könnten aber auch die Grundlage für einen formaleren, an politische Entscheidungsträger und internationale Finanzinstitutionen angebundenen Prozess der Standardsetzung bilden.

Kasten 10.3-4

Global Bioenergy Partnership (GBEP)

Ein bedeutsames Forum auf Regierungsebene ist die Global Bioenergy Partnership (GBEP). GBEP wurde 2005 auf Vorschlag Großbritanniens auf dem G8-Gipfel in Gleneagles ins Leben gerufen, um im Rahmen der Förderung erneuerbarer Energien die Entwicklung eines Biomasse- und Biotreibstoffmarkts voranzubringen. 2007 wurde die Partnerschaft in Heiligendamm in einem klaren Mandat bestätigt. Neben den G8 und den Outreach-Staaten (China, Indien, Mexiko, Brasilien, Südafrika) sind mehrere UN-Organisationen wie FAO, UNEP und UNDP beteiligt. GBEP ist institutionell bei der FAO in Rom angesiedelt.

Die GBEP ist eine hochrangige zwischenstaatliche Diskussionsplattform, die Industrie- und Schwellenländer in einen Dialog einbindet. Wesentliche Aufgaben sind, die Entwicklungen und Politiken in den einzelnen Ländern zusammenzufassen und beste Anwendungen zu identifizieren (GBEP, 2007, 2008). Außerdem sollen Methoden zur globalen Kohlenstoffbilanzierung sowie zu Nachhaltigkeitsstandards erarbeitet werden. Eine Task Force zu THG Bilanzen arbeitet seit 2007. Mitte 2008 wurde mit der Einsetzung einer Task Force zu globalen Nachhaltigkeitsstandards begonnen (GBEP, 2008). Um das Momentum der weltweit geführten Nachhaltigkeitsdiskussion zu nutzen, ist vorgesehen, Ergebnisse bereits 2009 zur G8 Sitzung in Italien zu präsentieren.

Zu nennen sind hier u.a. die UN-/UNCTAD-Biofuels Initiative (UNBI), die International Bioenergy Platform (IBEP) der FAO, Initiativen von UNEP zur Nachhaltigkeit von Bioenergie sowie die Global Bioenergy Partnership (GBEP; Kasten 10.3-4). Bedeutende Forschungsarbeit zur Nachhaltigkeit von Bioenergienutzung leisten außerdem die IEA Bioenergy Tasks 31 und 40 (van Dam et al., 2006). Gegenwärtig findet allerdings kaum eine internationale Koordination dieser vielfältigen Ansätze statt. Eine stärkere Bündelung und Koordination der Aktivitäten ist anzustreben.

Standards in der Projektfinanzierung

Die im Rahmen der verschiedenen Initiativen entwickelten Bioenergiestandards können und sollten auch von internationalen Finanzierungsorganisationen und Entwicklungsbanken als Standards für die Projektfinanzierung verwendet werden. So beabsichtigt beispielsweise die Globale Umweltfazilität (GEF) Nachhaltigkeitsleitlinien für ihre Bioenergieprojekte anzuwenden und im Rahmen der Durchführung von Projekten einen Zertifizierungsansatz für nachhaltig produzierte Biomasse zu entwickeln (Kasten 10.2-4; GEF, 2007a, b). Die Interamerikanische Entwicklungsbank (IDB) hat für die Entwicklung von Standards für Bioenergieprojekte eine Partnerschaft mit dem RSB angekündigt (Kasten 10.3-3). Dabei ist zu betonen, dass die hier angesprochenen Nachhaltigkeitsstandards für die Produktion von Bioenergieträgern über die in der Projektfinanzierung üblicherweise angewendeten „Safeguard Policies“ hinausgehen.

10.3.2.2 Bilaterale Abkommen

Die bisher besprochenen Ansätze zur Implementierung von Standards beruhten auf unilateralem Vorgehen der standardsetzenden Akteure. Unilaterale Ansätze stoßen an ihre Grenzen, wenn es um übergeordnete Fragen der Landnutzungsplanung, des Naturschutzes und der Ernährungssicherheit geht. Diese Fragen bedürfen einer zentralen Koordination auf nationaler (und idealerweise auch internationaler) Ebene und können nur sehr beschränkt über unilaterale Standards und damit verbundene Zertifizierungssysteme geregelt werden.

Grundsätzlich ist deshalb die Festlegung von Bioenergie-Standards in bi- und multilateralen Abkommen dem unilateralen Vorgehen vorzuziehen. Dies kann aus ökonomischer Sicht auch damit begründet werden, dass dadurch größere Teile des globalen Marktes unter die Standards fallen und die Wahrscheinlichkeit von Verdrängungseffekten so reduziert werden kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn – wie im Fall unilateraler Bioenergiestandards der EU – für die Exporteure große Ausweichmärkte existieren, d.h. wenn in anderen Importländern (z.B. USA, China, Japan) keine Nachhaltigkeitsstandards gelten. Außerdem wird die Akzeptanz von Bioenergiestandards bei den Handelspartnern vermutlich größer sein, wenn sie in den Prozess der Standardsetzung einbezogen wurden. Schließlich ist auch aus Sicht des WTO-Rechts bi- und multilaterales Vorgehen einem unilateralen Ansatz vorzuziehen (Kap. 10.3.4).

Während bilaterale Abkommen von vornherein lediglich die beteiligten Vertragspartner verpflichten, sind Drittstaaten durch die Regelungen nicht direkt betroffen. Somit ist hier in Bezug auf Importgüter auch die Einbeziehung von Sozialkriterien eher möglich als auf der Ebene unilateraler gesetzlicher Mindeststandards. Um das durch Zertifizierung schwierig zu fassende Problem der indirekten Verdrängungseffekte anzugehen, könnten die Produzentenländer einen Stopp oder zumindest eine deutliche Reduktion der Konversion natürlicher Ökosysteme im Land zusagen oder sicherstellen, dass der Anbau

von Energiepflanzen keine anderen Nutzungsformen verdrängt. Im Gegenzug sollte für die Handelspartner bei Einhaltung des Mindeststandards freier Marktzugang für Bioenergieträger gewährt werden.

Abkommen zu bilateralen Kooperationen im Bioenergie- und insbesondere im Biokraftstoffsektor gibt es bereits. Vor allem Brasilien bemüht sich derzeit um den Aufbau eines internationalen Biokraftstoffmarktes und bietet deshalb lateinamerikanischen, afrikanischen und asiatischen Entwicklungsländern (u.a. Venezuela, Kolumbien, Paraguay, Ecuador, Senegal, Angola, Indonesien) technische Hilfe und Wissenstransfer zum Aufbau von Biokraftstoffsektoren an. Als Finanzierungspartner der brasilianischen Kooperationsprojekte sind häufig Industrieländer wie etwa Schweden, Großbritannien oder Italien vorgesehen. Diese „Süd-Nord-Süd-Kooperationen“ haben jedoch in erster Linie den Aufbau von Märkten zum Ziel (Biopact, 2007a, b). Die Einführung von Nachhaltigkeitsstandards dürfte darin zunächst eine untergeordnete Rolle spielen.

Doch auch in Abkommen zwischen Industrie- und Schwellenländern finden sich bisher nur oberflächliche Aussagen zu Nachhaltigkeitsstandards. Das im Mai 2008 zwischen Deutschland und Brasilien unterzeichnete Abkommen betreffend die Zusammenarbeit im Bereich der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz enthält keinerlei konkrete Ziele in Bezug auf ökologische und soziale Kriterien nachhaltiger Produktion von Bioenergie. Es wurden lediglich Absichtserklärungen zur Aufnahme eines Dialogs zu Fragen der nachhaltigen Produktion abgegeben. In dieser Form kann es höchstens eine erste Vorstufe für gehaltvollere Verpflichtungen im Rahmen eines weiteren Vertrags bilden. Sehr ähnlich stellen sich die unterzeichneten Abkommen zwischen Brasilien und den Niederlanden bzw. Schweden zur Kooperation im Bioenergiesektor dar. Auch darin wird nur kurz auf eine geplante Zusammenarbeit im Bereich der nachhaltigen Produktion und Nutzung von Biokraftstoffen verwiesen. Es ist also davon auszugehen, dass konkrete Umwelt- und Sozialstandards für die Produktion von Bioenergieträgern in bilaterale Abkommen zwischen Staaten nur zögerlich Eingang finden werden. Im Falle des Abkommens zwischen Brasilien und Schweden ist es der Privatsektor, der die Umsetzung der Nachhaltigkeitsanforderungen in einem Zertifizierungsansatz übernommen hat (Kap. 10.3.2; SEKAB, 2008).

10.3.2.3 Multilaterale Ansätze

Unilaterale Maßnahmen einzelner Staaten wie auch bilaterale Abkommen haben von vornherein nur eine begrenzte räumliche Wirkung. Dazu kommt, dass eine Verbreitung uni- und bilateraler Standards den globalen Markt fragmentieren und den Handel zwischen verschiedenen Ländern mit unterschiedlichen Anforderungen an Bioenergieträger erheblich behindern würde. Demgegenüber wäre die Reichweite und Kompatibilität von Standards für Bioenergie am größten, wenn international ein einheitlicher multilateraler Ansatz verfolgt würde. Dadurch würden die Zertifizierungs- und Informationskosten der Produzenten reduziert. Die Festschreibung von Standards in einem multilateralen Vertragsregime wäre zudem auch aus Sicht der Kompatibilität mit dem Welthandelsrecht vorteilhaft (Kap. 10.3.4).

Als entsprechende Anknüpfungspunkte könnten zunächst bestehende multilaterale Umweltabkommen (etwa die Biodiversitätskonvention (Kap. 10.5), die Klimarahmenkonvention (Kap. 10.2) und die Desertifikationskonvention (Kap. 10.6)) genutzt werden. Im Rahmen dieser Abkommen könnten – in erster Linie auf der Ebene von Zusatzprotokollen – spezifische thematische Beiträge für die Standardsetzung im Bereich der Bioenergie entwickelt werden. Für die Biodiversitätskonvention wurde ein Verhandlungsprozess zu Bioenergie bereits beschlossen, der in diese Richtung ausgebaut werden sollte (Kap. 10.5.3). Da die einzelnen multilateralen Umweltabkommen allerdings jeweils nur einen begrenzten thematischen Zielrahmen haben, eignen sie sich nicht als Rahmen für die Entwicklung umfassender Bioenergiestandards.

Eine eigenständige multilaterale Bioenergie-Konvention hätte allerdings den Nachteil, dass die Aushandlung eines entsprechenden internationalen Abkommens erhebliche Zeit in Anspruch nimmt. Zudem ist angesichts der diversen Interessen der Akteure davon auszugehen, dass in einem besonderen multilateralen Abkommen nur relativ allgemeine Mindeststandards festgeschrieben werden können. Im Interesse längerfristiger Verwirklichung der Nachhaltigkeitsziele sollte jedoch – ungeachtet der soeben angesprochenen Anfangsprobleme – parallel dazu auch ein multilateraler Ansatz in Bezug auf Standards nachhaltiger Bioenergieproduktion verfolgt werden.

Wie beschrieben existieren bereits globale Aktivitäten, die sich in diesem Zusammenhang als Ausgangsbasis nutzen ließen (Kap. 10.3.2.1). Insbesondere die Initiative „Global Bioenergy Partnership“ (GBEP; Kasten 10.3-4), welche die wichtigsten Produzenten- wie auch Abnehmerländer zusammenführt, wäre grundsätzlich als institutionelles Forum für einen politisch wirksamen Diskurs geeignet. Als relativ überschaubares zwischenstaatliches Forum könnte GBEP die vielfältigen formellen und informellen Prozesse zur Erarbeitung von Nachhaltig-

keitskriterien bündeln und eine globale Standardformulierung vorantreiben. Dazu könnten beispielsweise die Vorschläge des WBGU, in denen u.a. die Ergebnisse des RSB (Kasten 10.3-3) aufgegriffen wurden, in die Arbeit der G8+5 Task Force on Sustainability (Kasten 10.3-4) eingebracht werden. Mit der politischen Unterstützung der G8 könnte erreicht werden, dass die Entscheidungen in politikrelevante Foren, Institutionen und Prozesse eingehen. Allerdings wäre dabei darauf hinzuwirken, dass betroffene zivilgesellschaftliche Akteure verstärkt am Dialog beteiligt werden, so dass der Diskurs unter Einbeziehung aller Interessenvertreter (Staaten, Industrie, Handel, NGOs usw.) erfolgt.

Anregungen für einen institutionellen Ausbau des Gremiums und dessen Tätigkeit könnte etwa die World Commission on Dams (WCD) bieten. Die Kommission, bestehend aus Regierungsvertretern, Internationalen Organisationen, NGOs, dem industriellen Sektor etc., wurde Ende der 90er Jahre eingerichtet, um in dem ebenfalls hoch umstrittenen Bereich der Nutzung von Staudämmen globale Standards und Kriterien zu erarbeiten. Auch hier gab es trotz vielfältiger politischer, ökologischer und wirtschaftlicher Interessen einen Konsens darüber, dass eine internationale Übereinkunft in diesem Gebiet notwendig sei. Die Prinzipien, welche durch die Kommission erarbeitet wurden, sind zwar rechtlich nicht verpflichtend, haben aber als so genanntes „soft law“ trotzdem eine wichtige Referenzfunktion, indem sie Richtlinien ökologischer und sozialer Stoßrichtung formulieren, die in vielen Entscheidungsprozessen eine wichtige Basis bilden (Thürer, 2000). Idealerweise würde ein solcher Katalog an Nachhaltigkeitsprinzipien für die Bioenergieproduktion verpflichtenden Charakter annehmen und von den beteiligten Staaten in entsprechende Vorschriften umgesetzt werden. Während bei der WCD die Weltbank und die IUCN initiierend wirkten, müsste im Hinblick auf einen ähnlichen Ansatz zur Bioenergie der FAO eine wichtige Rolle zukommen.

Das Ziel einer nachhaltigen Bioenergienutzung ist jedoch letztendlich durch entsprechende Standards im Bioenergiesektor allein nicht erreichbar. Standards für die energetische Nutzung von Biomasse können immer nur Teilmärkte der agrarischen Produktion erfassen und lösen das Schlüsselproblem der Verdrängungseffekte nur unzureichend. Bioenergie muss in eine nachhaltige, sektorübergreifende Landnutzung eingebettet sein, die sich an den vom WBGU entwickelten Leitplanken und Nachhaltigkeitsregeln orientiert (Kap. 3). Ein solches globales, sektorübergreifendes Landnutzungsmanagement könnte etwa von einer – noch zu gründenden – globalen Kommission für nachhaltige Landnutzung getragen sein (Kasten 10.3-5).

10.3.3 Implikationen von Standards für den Handel mit Bioenergieträgern

Sobald innerhalb der EU gesetzlich ein verpflichtender Bioenergiestandard eingeführt wird, sind auch ausländische Produzenten gezwungen, ihre Produkte bezüglich der Einhaltung des Standards zertifizieren zu lassen, wenn sie diese in der EU in Verkehr bringen möchten. Bioenergiestandards können dann zu faktischen Handelsbarrieren werden, falls die geforderten Standards in den Produzentenländern nicht ebenfalls gelten. Im Gegenzug kann die EU jedoch ihren Handelspartnern bei Einhaltung der Standards präferenzielle Einfuhrbedingungen gewähren.

10.3.3.1 Standards als Handelshemmnis

Ein einzelnes Land oder eine supranationale Organisation wie die EU kann die verpflichtende Standardsetzung bewusst einsetzen, um auf die Produktionsweise von Bioenergieträgern in den Exportländern Einfluss zu nehmen. Es besteht dabei die Gefahr, dass die Exportländer die durch Standardsetzung verursachte Handelsbeschränkung als protektionistische Maßnahme wahrnehmen und ein unilaterales Vorgehen auf wenig Akzeptanz bei den Handelspartnern stößt. Tatsache ist, dass sich die unilaterale Festsetzung von verpflichtenden Nachhaltigkeitsstandards im Ergebnis wie ein Importverbot auf nichtnachhaltig produzierte Bioenergieprodukte auswirkt und deshalb der WTO-Kompatibilitätsprüfung bedarf (Kap. 10.3.4).

Um die Akzeptanz der Mindeststandards zu erhöhen, sollten spürbare Marktzugangserleichterungen (z.B. deutliche Zollerleichterungen) für diejenigen Handelspartner vorgesehen werden, die die Mindeststandards einhalten. Zudem sollten generell die Zölle und Exportsubventionen im Agrarsektor weiter abgebaut werden.

Eine weit striktere Handelsbeschränkung wäre die Einführung eines generellen Importverbotes bzw. eines zeitlich beschränkten Importmoratoriums für Bioenergieträger. Alternativ könnte ebenso erwogen werden, nur Biomasse bzw. Bioenergie aus bestimmten Produktionsländern zum Import zuzulassen, wie es derzeit teilweise im Bereich der Lebensmittel- und Produktsicherheit praktiziert wird. Letztendlich würden solche im Vergleich zu Mindeststandards undifferenzierte Einfuhrbeschränkungen die Exportchancen für die Produzenten in den Herkunftsländern erheblich stärker mindern und voraussichtlich bei den Handelspartnern auf weitaus geringere Akzeptanz stoßen.

Kasten 10.3-5

Vision einer globalen Kommission für nachhaltige Landnutzung

Mittelfristig sollten alle forst- und landwirtschaftlichen Praktiken nachhaltig gestaltet werden und einheitlichen Grundsätzen unterliegen. Dieser Anspruch geht jedoch weit über die Formulierung von Standards hinaus. Wie die Analyse des WBGU zeigt, steckt in der Frage konkurrierender Landnutzungsansprüche ein großes Konfliktpotenzial. Bereits heute zeichnen sich krisenhafte Entwicklungen bei der globalen Ernährungssicherheit oder durch den Verlust von Ökosystemen ab. Dieser Druck auf die Landnutzung und die gesellschaftlichen Systeme wird weiter steigen. Zukünftig müssen eine wachsende Weltbevölkerung, zunehmend flächenintensive Ernährungsmuster – nicht nur in den OECD-, sondern auch in den schnell wachsenden Schwellenländern, vor allem China und Indien – und eine steigende Nachfrage nach stofflicher Nutzung von Biomasse in einer Situation verstärkter Bodendegradation, wachsender Wasserknappheit und klimatischem Stress miteinander in Einklang gebracht werden. Dies ist eine globale Herausforderung, die in ihren Ausmaßen und ihrer Komplexität bisher nur wenig verstanden ist und in internationalen Governance-Prozessen nur in Teilaspekten (z.B. im Rahmen der FAO und der CBD) behandelt wird.

Der Beirat hält es angesichts dieser Herausforderung an das Landnutzungsmanagement für notwendig, die Frage der globalen Landnutzung auf internationaler Ebene stärker zu thematisieren und institutionell zu verankern. Dafür sollte eine neue globale Kommission für nachhaltige Landnutzung eingerichtet werden. Die Aufgabe der Kommission soll darin bestehen, die wichtigen Herausforderungen im Themenkomplex der globalen Landnutzung zu identifizieren und den Stand des Wissens zusammenzutragen. Darauf aufbauend sollte die Kommission Grundlagen, Mechanismen und Leitlinien zum globalen Landnutzungsmanagement erarbeiten. Damit ist ein komplexes neues Feld globaler Governance angesprochen, in dem ernährungs-, energie-, entwicklungs- und umweltpolitische Fragen zusammenwirken. Die Kommission wird sich mit komplexen und durch Interessengegensätze geprägte Problemlagen beschäftigen. Ausgangspunkt wird sein, die internationale Datenlage über den Status Quo der globalen Landnutzung und Bodenbeschaffenheit zu verbessern und international zu vereinheitlichen. Ein gemeinsames Verständnis der grundlegenden Probleme muss erarbeitet und die vielfältigen Interessen um die Landnutzung von der lokalen bis zur globalen Ebene identifiziert werden. Letztlich wird damit auch eine tief greifende Veränderung etablierter Sichtweisen und Praktiken gefordert: Es ist nicht mehr möglich, Landnutzung als ausschließliches Feld souveränen staatlichen Handelns zu begreifen. Entwicklungen, die Auswirkungen auf die Landnutzung haben, sind angesichts der vielfältigen globalen Wechselwirkungen und Verflechtungen nicht mehr nur national zu fassen und zu bearbeiten. Das belegt das Beispiel der indirekten Landnutzungsänderungen im Zusammenhang mit dem Ausbau der Bioenergie ebenso wie die Frage eines gerechten Pro-Kopf-Flächenverbrauchs. Deshalb bedarf es einer grenzüberschreitenden Zusammenarbeit, die diese komplexen Fragen der nachhaltigen und gerechten Landnutzung in einem offenen Prozess thematisiert, sich an die Probleme herantastet und langfristige Regulierungsvorschläge erarbeitet.

Vorbild für solch eine Institution könnte beispielsweise die Financial Action Task Force on Money Laundering (FATF) sein. Die von der G7 einberufene FATF startete 1989 als eine kleine, dynamische Expertengruppe, die zu dem auf internationaler Ebene neu zu erschließenden Politikfeld der Bekämpfung der Geldwäsche eingesetzt wurde. Mittlerweile hat sich das Gremium erweitert und Leitlinien und Standards erarbeitet, die von vielen Staaten und Organisationen anerkannt werden. Dazu wurde ein globales Peer-Review- und Monitoring-Verfahren installiert (Reinicke und Reinicke, 1998; Sharman, 2008).

Die neue globale Kommission für nachhaltige Landnutzung, deren Zuständigkeit – wie oben skizziert – weit über Fragen der Landnutzung im engeren Sinne hinausgeht, könnte bei UNEP angegliedert werden und in enger Zusammenarbeit mit anderen UN-Organisationen, etwa der FAO, stehen. Die Ergebnisse dieses Prozesses sollten regelmäßig auf die internationale Agenda gesetzt werden, beispielsweise im Rahmen des globalen Umweltministerforums des UNEP. Wichtig wäre zudem die Aufnahme und Diskussion der Thematik innerhalb des strategisch wichtigen Forums der Staats- und Regierungschefs der G8+5. So würde die Wahrscheinlichkeit bedeutend erhöht, dass die Erkenntnisse und Entscheidungen eine breite Öffentlichkeit erreichen und in relevante Politikprozesse eingespeist werden.

10.3.3.2 Implikationen für Handelsbeziehungen mit Entwicklungs- und Schwellenländern

Eine besondere Situation ergibt sich gegenüber den Entwicklungs- und Schwellenländern. Diesen Ländern gewährt die Europäische Gemeinschaft seit 1971 in ihrem „Allgemeinen Präferenzsystem“ (APS) bzw. „Generalised System of Preferences“ (GSP) Vorzugsbedingungen bei der Einfuhr von Waren in die EU und damit auch für Rohstoffe, die zur Erzeugung von Bioenergie verwendet werden können. Zu den GSP-Ländern gehören u.a. wichtige Bioenergie-Produktionsländer wie Brasilien, Argentinien, Indonesien und Malaysia. Aber auch unter den am wenigsten entwickelten Ländern (LDCs), die im APS unter die speziellen Vorzugsbedingungen der „Alles-außer-Waffen“-Initiative fallen, sind einige Länder mit Bioenergie-Produktionspotenzial, so z.B. Malawi, Mosambik oder Sambia (Johnson et al., 2006). Weiterhin gewährt die EU den so genannten AKP-Staaten (Gruppe der afrikanischen, karibischen und pazifischen Staaten) den zollfreien Export in die EU. In ihrer Biokraftstoffstrategie betont die EU-Kommission, dass sie den AKP-Staaten auch weiterhin einen präferenziellen Marktzugang im derzeitigen Umfang gewähren wird (EU-Kommission, 2006b). Ebenso laufen aktuell Verhandlungen mit den MERCOSUR-Staaten, d.h. mit Argentinien,

Brasilien, Paraguay und Uruguay, über präferenzielle Einfuhrbedingungen in die EU (Dufey, 2006).

Es tritt somit ein Zielkonflikt zwischen der Förderung des Handels mit Entwicklungs- und Schwellenländern und der Forderung nach Nachhaltigkeitsstandards auf. So basiert beispielsweise das Volkseinkommen in zwei Dritteln der LDCs zu 30–60 % auf dem Agrarsektor. Auf die Europäische Union entfällt – bezogen auf die Exporte der LDCs nach Japan, den USA, Kanada und die EU – ein Anteil von 70 % der Agrarexporte. Damit stellt die EU-27 einen bedeutenden Absatzmarkt für diese Länder dar (EU-Kommission, 2008b). Das Einsetzen von Nachhaltigkeitsstandards ohne entsprechende technische und finanzielle Kooperationsangebote würde für diese Länder eine unverhältnismäßig hohe Bürde bedeuten (Grote, 2002) und der entwicklungspolitischen Grundmotivation für die Zollbefreiung dieser Länder zuwiderlaufen.

Dieser Zielkonflikt könnte so gelöst werden, dass kleinen und mittleren Unternehmen in Entwicklungs- und Schwellenländern Unterstützung bei der Umsetzung der Standards angeboten wird. Insbesondere die LDCs, denen die EU derzeit unter der „Alles-außer-Waffen"-Initiative zollfreie bzw. zollreduzierte Importe von Waren garantiert, müssen bei der Umsetzung der geforderten Standards finanziell und technisch unterstützt werden. Zudem können für Entwicklungsländer zur Senkung der Transaktionskosten in einer Anfangsphase Vereinfachungen bei der Verifizierung der Zertifizierungskriterien vorgesehen werden (z.B. Ansetzen von Default-Werten). Ebenso ist die Gruppenzertifizierung eine geeignete Möglichkeit, die Zertifizierungskosten für kleine landwirtschaftliche Betriebe speziell in Entwicklungsländern – aber auch in Industrie- und Schwellenländern – gering zu halten.

10.3.3.3 Präferenzielle Behandlung von Bioenergieträgern durch Qualifizierung als „Environmental Goods and Services„ (EGS)

Eine präferenzielle Behandlung von Rohstoffen für Bioenergienutzung könnte außerdem in einem multilateralen Rahmen auch aus den Liberalisierungsbestrebungen resultieren, welche durch die WTO seit einiger Zeit beim Handel mit so genannten „Environmental Goods and Services" (EGS) verfolgt werden (zum Folgenden etwa Chaytor, 2002; Iturregui und Dutschke, 2005; Singh, 2005; Dufey, 2006; Sell, 2006; Sugathan, 2006; Yu, 2007).

Im Rahmen der seit 2001 andauernden Doha-Verhandlungsrunde wurde unter verschiedenen Mandaten zur Fortentwicklung des WTO-Rechts in Bezug auf Maßnahmen des Umweltschutzes die Liberalisierung des Handels mit EGS als Ziel formuliert (Ministererklärung von Doha, Para. 31 [iii]). Es wird angestrebt, für ausgewählte, als besonders umweltfreundlich erachtete Produkte oder Dienstleistungen den Marktzugang zu verbessern, indem Zölle und andere Handelshemmnisse für die als EGS deklarierten Waren und Dienstleistungen beseitigt werden.

Die Frage, welche Güter als EGS zu qualifizieren seien, ist unter den WTO-Vertragsstaaten umstritten. Es ist aber davon auszugehen, dass auch Güter aus dem Bereich der erneuerbaren Energien und insbesondere der Bioenergie für solche Liberalisierungsmaßnahmen in Frage kommen (vgl. Singh, 2005). Einen entsprechenden Vorstoß hat Brasilien unternommen, das im November 2007 im Rahmen des Committee on Trade and Environment der WTO beantragte, Biotreibstoffe seien generell als „Environmental Goods" zu betrachten.

Im Vorfeld der Klimakonferenz von Bali im Dezember 2007 präsentierten zudem die EU und die USA an die Adresse der WTO einen gemeinsamen Vorschlag, Technologien mit Eignung zur Bekämpfung des Klimawandels als EGS besonders zu privilegieren. Gemäß diesem Vorschlag sollten in einer ersten Stufe insgesamt 43 „besonders klimafreundliche" Technologien (z.B. Solarzellen und Windturbinen) mit sofortiger Wirkung von Zöllen und ähnlichen Handelsbeschränkungen befreit werden. Als zweiter Schritt sollte anschließend im Rahmen des Doha-Prozesses ein „Environmental Goods and Services Agreement" ausgehandelt werden, das weitere als EGS zu qualifizierende Güter und Dienstleistungen umfassen sollte. Die EU und die USA plädierten allerdings gegen eine Aufnahme von Biokraftstoffen in die Liste der primären „klimafreundlichen" Technologien, was insbesondere durch Brasilien kritisiert wurde. Die EU sprach sich im Übrigen generell dafür aus, lediglich Nicht-Agrarprodukte aufzulisten.

Die Doha-Verhandlungsrunde ist in den letzten Jahren mehrfach ins Stocken geraten. Nach dem Abbruch des WTO-Ministertreffens vom Juli 2008 in Genf ist angesichts der bestehenden politischen Differenzen insgesamt unklar, wie und in welchem zeitlichen Rahmen sich die Verhandlungen weiterentwickeln werden. Wie bei vielen anderen Aspekten der laufenden WTO-Verhandlungsrunde ist auch in Bezug auf EGS offen, welche Resultate zu erreichen sind. Zu den strittigen wichtigen Punkten gehört hier die vom Committee on Trade and Environment zu behandelnde Frage, unter welchen Voraussetzungen die erforderliche Umweltfreundlichkeit eines Produkts oder einer Dienstleistung gegeben ist. Die angestrebte Liberalisierung ist aus ökologischer Sicht nur dann sinnvoll, wenn durch die Einstufung als EGS nicht das Umweltschutzziel unterlau-

fen wird, indem die als EGS deklarierten Güter und Dienstleistungen pauschal und nicht gemäß ihrer individuellen Lebenszyklusbilanz beurteilt werden. Dies erfordert allgemein, dass bei der Debatte über EGS im Rahmen der WTO auch Nachhaltigkeitskriterien (im Sinne der vom WBGU in Kapitel 10.3.1 formulierten) berücksichtigt werden, die zudem auch die Herstellungsprozesse einbeziehen. Allerdings ist es fraglich, ob bei der Auswahl der EGS eine Anwendung spezifischer Standards, wie sie der WBGU für notwendig hält, politisch durchsetzbar ist. Deutschland und die EU sollten sich deshalb im Rahmen der EGS-Verhandlungen für eine angemessene Berücksichtigung der Umweltschutzziele einsetzen.

Falls eine Beurteilung gemäß der individuellen Lebenszyklusbilanz der Güter nicht durchgesetzt werden kann, plädiert der WBGU gegen eine Aufnahme von Biokraftstoffen in die Liste der EGS, da eine pauschale Beurteilung ihrer sozialen und ökologischen Nachhaltigkeit nicht möglich ist. Es könnte jedoch erwogen werden, bestimmte förderungswürdige, aus ausgewählten Bioenergiepfaden resultierende Bioenergieträger als EGS zu deklarieren.

10.3.4 WTO-Kompatibilität von Standards für Bioenergieträger

Bezüglich des vom WBGU geforderten gesetzlichen Mindeststandards ist nach der Vereinbarkeit mit den relevanten Bestimmungen des WTO-Rechts zu fragen. Die vom WBGU empfohlenen Nachhaltigkeitsprinzipien des Mindeststandards beziehen sich auf die Herstellungsprozesse im Herkunftsland und sind somit als nicht-produktbezogene Maßnahmen anzusehen (zur Unterscheidung zwischen produktbezogenen und nicht-produktbezogenen Maßnahmen Droege, 2001; Puth, 2003; Hilf und Oeter, 2005). Während bei produktbezogenen umweltpolitisch motivierten Handelsbeschränkungen – die also auf die Eigenschaften des Produkts selbst Bezug nehmen – die Vereinbarkeit mit den Vorgaben des WTO-Rechts grundsätzlich – unter der Voraussetzung, dass die jeweiligen Maßnahmen tatsächlich umweltpolitischen Zielen dienen – gegeben ist (Hilf und Oeter, 2005), bestehen hinsichtlich der WTO-Konformität nicht-produktbezogener Maßnahmen erhebliche Differenzen.

10.3.4.1 Relevanz des WTO-Rechts bei der Standardsetzung

Bei der Beurteilung der WTO-Konformität von Standardsetzung, welche sich auf den Herstellungsprozess bezieht, muss zunächst zwischen staatlichen und rein privaten Maßnahmen unterschieden werden. Sowohl bei verpflichtender Zertifizierung im Rahmen gesetzlicher Standardsetzung als auch bei freiwilliger, aber vom Staat zur Verfügung gestellter Zertifizierung, besteht die Möglichkeit einer handelshemmenden Wirkung. Dagegen sind rein private Maßnahmen unter dem Aspekt der Bestimmungen des GATT, der grundsätzlich nur Staaten berechtigt und verpflichtet, von vornherein unproblematisch (Droege, 2001; Blüthner, 2004; Hilf und Oeter, 2005).

Für die rechtliche Beurteilung sind in erster Linie Art. III GATT (Gebot der Inländergleichbehandlung) und Art. XI GATT (Verbot mengenmäßiger Beschränkungen des Imports oder Exports) von Bedeutung. Dabei kommt die erstgenannte Vorschrift für interne Maßnahmen, die letztgenannte für Beschränkungen und Verbote an der Grenze zur Anwendung (Puth, 2005). Sollten Handelsbeschränkungen eingeführt werden, die ausschließlich die Produkte bestimmter Länder betreffen, so wäre außerdem Art. I GATT (Prinzip der Meistbegünstigung) zu beachten.

Das Gebot der Inländergleichbehandlung wird gegenüber eingeführten Produkten gemäß Art. III:4 GATT dann verletzt, wenn (erstens) die fragliche Maßnahme auf einer internen (nationalen) Vorschrift beruht, (zweitens) die betroffenen eingeführten und inländischen Produkte gleichartig („like products“) sind und (drittens) die betroffenen eingeführten Produkte im Vergleich zu gleichartigen inländischen Produkten einer weniger günstigen Behandlung unterworfen werden (Puth, 2003).

Zu einem potenziellen Konflikt zwischen Nachhaltigkeitsstandards und WTO-Recht führt dabei – soweit ausländische Produkte im Vergleich zu inländischen schlechter behandelt werden, was auch dann der Fall ist, wenn eine faktische Ungleichbehandlung vorliegt (etwa, weil einheimische Produkte eher bestimmte Standards erfüllen) – insbesondere das zweite Kriterium betreffend die „Gleichartigkeit“ von Produkten. Die Spruchpraxis der WTO-Streitbeilegungsorgane geht davon aus (wie etwa das WTO-Panel im Fall „Japan – Taxes on Alcoholic Beverages“, 1996), dass identische Güter auch dann als gleichartig zu qualifizieren sind, wenn sie mit unterschiedlichen Methoden produziert worden sind. Unterschiede in den Produktionsmethoden dürfen daher grundsätzlich nicht berücksichtigt werden, wenn das Produktionsergebnis „gleichartig“ ist (Droege, 2001). Diese Voraussetzung ist bei den hier in Frage kommenden Maßnahmen in der Regel gegeben, denn die jeweiligen Standards und Zertifizierungen stellen auf die Art und Weise der Herstellung ab.

Somit muss davon ausgegangen werden, dass bei völliger physischer Übereinstimmung von Produkten, die sich nur durch die verwendeten nicht-produktbezogenen Herstellungsmethoden unterscheiden, die Gleichartigkeit im Sinne von Art. III:4 GATT gegeben ist (Hilf und Oeter, 2005). Dies hat zur Folge, dass die staatlich unterstützte Setzung von Umwelt- und/oder Sozialstandards und deren Umsetzungskontrolle durch Zertifizierungssysteme mit dem Gebot der Inländergleichbehandlung in Konflikt gerät. Dies gilt auch für andere unilaterale Maßnahmen, die bestimmte Produkte wegen ihrer Produktionsart einer ungünstigeren Behandlung unterwerfen, wie es etwa im Rahmen einer entsprechenden Förderpolitik der Fall wäre.

Wird die Einfuhr von Produkten – wie etwa Biokraftstoffen – verboten oder beschränkt, weil sie bestimmten Standards nicht genügen, so ergibt sich außerdem ein Konflikt mit Art. XI GATT. Eine Unvereinbarkeit mit Art. I GATT resultiert schließlich, wenn darüber hinaus erwogen wird, lediglich Bioenergie aus bestimmten Produktionsländern – etwa weil diese keine allgemeinen Herstellungsstandards kennen – zum Import zuzulassen. Zusammenfassend droht somit bei staatlich unterstützten Maßnahmen zur Gewährleistung nachhaltiger Produktion von Bioenergie je nach konkreter Ausgestaltung in dreierlei Hinsicht eine Verletzung relevanter Gebote des WTO-Rechts. Allerdings kommt in allen Fällen eine Rechtfertigung für die Setzung von Nachhaltigkeitsstandards in Betracht.

10.3.4.2 Rechtfertigung diskriminierender Maßnahmen

Die verschiedenen Abkommen sehen Ausnahmeklauseln vor, die gerade im Bereich des Umweltschutzes zur Anwendung gelangen können und gegebenenfalls einen Verstoß gegen die Regeln des GATT (und gegebenenfalls auch ergänzender WTO-Abkommen) rechtfertigen. So stellt sich insbesondere die Frage, ob ein durch die Setzung von Nachhaltigkeitsstandards (und deren Durchsetzung durch Zertifizierungs- und Labelingsysteme) anzunehmender Verstoß gegen Art. III:4 GATT oder ein Verstoß gegen Art. XI GATT gestützt auf die Klauseln des Art. XX GATT gerechtfertigt sein kann.

Ansätze zur Rechtfertigung umweltpolitisch motivierter Massnahmen

In diesem Zusammenhang ist zunächst auf umweltpolitisch motivierte Standards einzugehen. Art. XX GATT sieht Ausnahmen für Maßnahmen zum Schutz des Lebens und der Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen (Bst. b) sowie für Maßnahmen zur Erhaltung erschöpflicher Naturschätze (Bst. g) vor. Zwar ist somit die Umwelt als solche nicht im Katalog der geschützten Rechtsgüter enthalten, doch bieten die genannten Bst. b und g durchaus Raum zu deren Berücksichtigung (Epiney, 2000; Epiney und Scheyli, 2000; Hilf und Oeter, 2005). Auf dieser Grundlage ist heute weitgehend anerkannt, dass auch das „allgemeine“ Anliegen des Umweltschutzes nach diesen Bestimmungen Ausnahmen rechtfertigen kann.

Auch wenn die genaue Auslegung und Anwendung des Art. XX GATT bis heute umstritten ist, kann gestützt auf die Spruchpraxis der WTO-Streitbeilegungsorgane davon ausgegangen werden, dass auch rein prozessbezogene Handelsmaßnahmen – und insofern auch die Standardsetzung und deren Umsetzungskontrolle durch Zertifizierungssysteme – grundsätzlich in den Schutzbereich von Art. XX GATT fallen (Hilf und Oeter, 2005; in diese Richtung auch Droege, 2001). Insbesondere stellte der Appellate Body im Fall „US-Shrimp“ (1998), bei dem es um die Gefährdung von Meeresschildkröten durch den Fang von Garnelen ging, klar, dass die Produktionsmethode als Unterscheidungskriterium durchaus zulässig sein kann, soweit die Produktionsweise eine bestimmte Tierart gefährdet. Es sei nämlich kein Grund ersichtlich, weshalb nicht-produktbezogene Handelsmaßnahmen von vornherein als WTO-rechtswidrig zu betrachten seien (Althammer et al., 2001; Droege, 2001; Puth, 2003). Darüber hinaus wurde in diesem Fall außerdem klargestellt, dass grundsätzlich auch solche Maßnahmen einer Rechtfertigung zugänglich sind, die Schutzgüter außerhalb des Territoriums derjenigen Staaten betreffen, die die umweltpolitische Maßnahme verfolgen (sog. extraterritoriale Anwendung des Art. XX GATT).

Im Hinblick auf einen möglichen Streitfall betreffend die WTO-Konformität von produktionsbezogenen Umweltstandards für importierte Produkte liegt eine potenzielle Schwierigkeit darin, dass die Beweislast in Bezug auf das Vorhandensein der Ausnahmekriterien auf Seiten des Staats liegt, der auf die Rechtfertigung eines Verstoßes gegen die Welthandelsprinzipien pocht. Zur Verteidigung einer Diskriminierung im Sinne von Art. III:4 GATT durch ökologisch motivierte Nachhaltigkeitsstandards müsste der betreffende Staat somit belegen können, dass keine andere, weniger einschneidende Maßnahme möglich ist, um das umweltpolitische Ziel zu erreichen (Grundsatz der Verhältnismäßigkeit). Außerdem ist das Vorhandensein einer objektiven Gefährdungslage zu belegen (vgl. zum einschlägigen Prüfungsprogramm zuletzt den Bericht des WTO-Panels „Brazil – Measures Affecting Imports of Retreaded Tyres“ aus dem Jahr 2007; Qin, 2007).

Die Rechtfertigung eines Verstoßes gegen die einschlägigen Gebote des WTO-Rechts lässt sich gestützt

auf die Art. XX GATT am überzeugendsten begründen, wenn aus einem multilateralen Übereinkommen hervorgeht, dass ein internationaler Konsens bezüglich der Unverzichtbarkeit und entsprechenden Schützenswürdigkeit eines bestimmten Umweltguts besteht. Von einem solchen Konsens ist insbesondere hinsichtlich des globalen Klimas und der globalen Artenvielfalt auszugehen, für die im Rahmen der jeweiligen Vertragsregime (Klimarahmenkonvention und Biodiversitätskonvention mit den jeweiligen Zusatzprotokollen) konkrete Schutzziele gelten. Diese Zielsetzungen werden durch die Anliegen des Art. XX Bst. b und g GATT erfasst; auch stehen sie grundsätzlich mit der sog. Chapeau-Klausel von Art. XX GATT im Einklang, sofern sie in einer Weise angewandt werden, die zu keiner willkürlichen oder ungerechtfertigten Diskriminierung führt.

Insgesamt ist somit davon auszugehen, dass unilaterale Maßnahmen, die über die Definition von produktionsbezogenen Anforderungen handelsbeschränkende Wirkungen entfalten, gerechtfertigt werden können und sich insofern mit den Vorgaben des WTO-Rechts vereinbaren lassen. Allerdings ist die bisherige Rechtsprechung der Streitbeilegungsorgane der WTO noch nicht wirklich dogmatisch gefestigt und weist auch einige Schwankungen auf. Es lässt sich daher nicht mit Sicherheit voraussagen, wie die Entscheidung der zuständigen Streitbeilegungsorgane der WTO ausfallen würde, sollte es zu einer Anfechtung entsprechender unilateraler Maßnahmen durch einen Mitgliedstaat kommen. Angesichts der vorhandenen Ungewissheit sollten somit umweltpolitische Maßnahmen zur Gewährleistung der nachhaltigen Produktion von Bioenergie nach Möglichkeit auf multilateraler Ebene entwickelt werden (Kap. 10.3.2.3)

Ansätze zur Rechtfertigung sozialpolitisch motivierter Massnahmen

Gesonderte Fragen stellen sich in Bezug auf Maßnahmen, insbesondere Standards, die auf sozialpolitischen Motiven beruhen. Auch hier stehen die damit einhergehenden Handelsbeschränkungen in potenziellem Konflikt mit den bereits erwähnten Diskriminierungsverboten des WTO-Rechts, insbesondere dem Gebot der Inländergleichbehandlung und dem Verbot mengenmäßiger Beschränkungen des Imports oder Exports.

Unter den in Art. XX GATT genannten Ausnahmen sind keine ausdrücklichen sozialen oder anderweitige menschenrechtliche Schutzziele aufgeführt. Allerdings lässt sich auch in diesem Zusammenhang die Ansicht vertreten, entsprechende Rechtsgüter seien in den generalklauselartigen, weit formulierten Bestimmungen enthalten. In Frage kommt dabei eine Einstufung sozialpolitisch motivierten Vorgehens als Maßnahme zum Schutz der öffentlichen Sittlichkeit (Bst. a) sowie als Maßnahme zum Schutz des Lebens und der Gesundheit von Menschen (Bst. b). Es wird in der Literatur zudem auch die Meinung vertreten, die vorhin umrissene Argumentationsweise der WTO-Streitbeilegungsorgane zur Rechtfertigung umweltpolitischer Maßnahmen lasse sich – jedenfalls potenziell – auch auf sozialpolitische Ziele übertragen (López-Hurtado, 2002). Die Argumentation geht ferner dahin, dass gerade dann, wenn sozialpolitische Maßnahmen Prinzipien zur Durchsetzung verhelfen wollen, die in multilateralen internationalen Abkommen besonders stark verankert und insofern von einem weit reichenden Konsens getragen sind, eine entsprechende Rechtfertigung möglich sein soll. Genannt werden dabei insbesondere die in den zentralen Abkommen der ILO statuierten Kernarbeitsnormen (etwa betreffend das Verbot der Kinderarbeit und der Zwangsarbeit).

Über die bereits bezüglich umweltpolitischer Maßnahmen angeführten Ungewissheiten hinaus liegen hier besondere Schwierigkeiten vor. Im Rahmen der WTO wurde explizit darüber diskutiert, in den Ausnahmekatalog von Art. XX besondere Sozialstandards aufzunehmen. Bislang scheiterte dies aber – obwohl sich diese auf die allgemein anerkannten fundamentalen Sozialstandards gemäß den ILO-Kernbereichen beschränken sollten – am Widerstand der Mehrzahl der Entwicklungsländer. Entsprechend ist es unsicher, ob eine Mehrheit der Vertragsstaaten einer Argumentation, die vorhandenen Ausnahmeklauseln gemäß Art. XX Bst. a und b GATT umfassten auch sozialpolitische und allgemeine menschenrechtliche Aspekte, zustimmen würde. Ob in einem möglichen Streitfall betreffend die WTO-Konformität von Sozialstandards für eingeführte Produkte ein Rekurs auf die Rechtfertigungsgründe des Art. XX GATT Erfolg haben würde, ist beim heutigen Stand der Dinge sehr fraglich.

10.3.4.3 Juristische Bewertung der vom WBGU empfohlenen Nachhaltigkeitsstandards

Solange die WTO-Verträge – abgesehen von den erwähnten Ausnahmeklauseln – keine ausdrücklichen Zielvorgaben ökologischer und sozialer Richtung enthalten, ist die Frage der handelsrechtlichen Konformität nachhaltigkeitsorientierter Maßnahmen letztlich von der Einschätzung der Streitbeilegungsorgane der WTO abhängig. Bislang liegt insbesondere zur WTO-Konformität unilateraler Nachhaltigkeitsstandards keine entsprechende Praxis vor. Sollte die EU im Rahmen ihrer Rechtsetzung – wie es dem Vorschlag des WBGU entspricht – unilateral die

Nutzung von Bioenergieträgern von der Einhaltung von Mindeststandards abhängig machen, so liegt es aber durchaus im Bereich des Möglichen, dass Drittstaaten in einem solchen Vorgehen eine rechtswidrige Handelsbeschränkung sehen und vor den WTO-Organen eine entsprechende Verletzung der Diskriminierungsverbote geltend machen.

Unsicherheitsfaktoren in Bezug auf eine künftige Beurteilung durch die Streitbeilegungsorgane der WTO sind insbesondere der geforderte Beleg, dass ein bestimmter Nachhaltigkeitsstandard unverzichtbar ist und insofern dem Verhältnismäßigkeitsgrundsatz gerecht wird, sowie die Frage, in welchem Ausmaß eine extraterritoriale Zielsetzung von Standards als zulässig erachtet wird. Auf dieser Grundlage scheint es immerhin möglich, eine Einschätzung abzugeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit verschiedene Kategorien unilateraler Nachhaltigkeitsstandards gestützt auf Art. XX GATT die Zustimmung der WTO-Organe finden könnten (vgl. auch BTG, 2008).

Eine solche vorläufige Einschätzung fällt insbesondere für solche Kriterien positiv aus, die darauf abzielen, die globale Treibhausgasbilanz zu verbessern. Zum einen ist diese klimapolitische Zielsetzung im Rahmen des völkerrechtlichen Klimaregimes (UNFCCC, Kioto-Protokoll) eindeutig anerkannt, und die Unverzichtbarkeit des klimapolitischen Kriteriums lässt sich klar belegen. Da sich der Klimawandel global auswirkt, wäre zudem selbst dann von der Rechtfertigung entsprechender Maßnahmen auszugehen, wenn die Zulässigkeit einer extraterritorialen Anwendung von Art. XX GATT in Zweifel gezogen würde.

Ähnlich verhält es sich bezüglich eines Kriteriums zum Schutz der Biodiversität. Auch hier besteht aufgrund der Verankerung entsprechender Zielsetzungen in der Biodiversitätskonvention (CBD) ein eindeutiger Konsens. Zwar ist die globale Wirkung eines Verlusts der Artenvielfalt weniger einfach nachzuweisen als im Falle des Klimaschutzes, dennoch aber nicht von der Hand zu weisen. Sollten die Streitbeilegungsorgane der WTO auch künftig dem Standpunkt folgen, dass auch Maßnahmen gerechtfertigt werden können, die Schutzgüter außerhalb des Territoriums des die Regelung erlassenden Staats betreffen, so wären zudem auch Kriterien zulässig, welche den Schutz lokaler Biodiversität bezwecken.

Schwieriger ist demgegenüber die Beurteilung von Kriterien, welche rein lokale ökologische Schutzziele in den Produzentenländern betreffen. Hier stellt sich die Frage, inwiefern sich der Konsens in Bezug auf die Unverzichtbarkeit und entsprechend die Wahrung des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes belegen lässt. Eine positive Einschätzung im Streitfall ist aber – wie die Rechtsprechung insbesondere im Fall „US-Shrimp“ zeigt – jedenfalls nicht von vornherein auszuschließen.

Weitgehend ungeklärt ist demgegenüber im heutigen Stand die Frage, ob sozialpolitisch motivierte Standards aus WTO-rechtlicher Sicht zulässig sind. Angesichts des Widerstands einer großen Zahl von Staaten gegenüber der Einführung selbst fundamentaler Sozialstandards ist davon auszugehen, dass solche Kriterien im Streitfall als nicht WTO-konform eingestuft würden. Dies sollte jedoch nicht als Hindernis bei der Forderung der Einhaltung wichtiger Sozialstandards angesehen werden. Vielmehr ist auf eine entsprechende Anpassung des WTO-Rechts hinzuwirken.

10.3.5 Zwischenfazit

Bioenergiestandards sind unerlässlich, um die Produktion von Bioenergieprodukten in nachhaltige Bahnen zu lenken. Die Effektivität eines Standards ist am größten, je mehr Bioenergieträger durch ihn erfasst werden. Durch die Einbeziehung möglichst vieler Länder in die Entwicklung einer globalen Bioenergiestrategie kann eine hohe Breitenwirkung erzielt werden. Auch aus Sicht des WTO-Rechts ist grundsätzlich ein abgestimmtes multilaterales Vorgehen unilateralen Maßnahmen vorzuziehen. Dabei ist jedoch davon auszugehen, dass zumindest kurzfristig aufgrund verschiedener einzelstaatlicher Interessen auf internationaler Ebene nur relativ schwache und wenig effektive Mindeststandards ausgehandelt werden könnten.

Eine größere Tiefenwirkung hätte ein strengerer Standard, der wiederum nur als freiwilliger oder unilateraler verpflichtender Standard durchgesetzt werden könnte. Da freiwillige Zertifizierungssysteme – wie es die bisherigen Erfahrungen mit freiwilligen Systemen etwa im Forstbereich sowie im bei grünem Strom zeigen – in einem Markt für Bioenergieträger voraussichtlich nur ein Nischendasein führen können, erscheinen kurzfristig unilaterale Mindeststandards seitens der EU als die effektivste Option. Die Frage, ob solche unilaterale Standards in einem Streitfall durch die Organe der WTO als mit dem internationalen Handelsrecht vereinbar eingestuft würden, kann zwar nicht abschließend beantwortet werden. In Bezug auf die wichtigsten Nachhaltigkeitskriterien ist eine entsprechende Argumentation gestützt auf die bestehende Rechtsprechung durchaus möglich (Kap. 10.3.4), womit die Konformität mit dem WTO-Recht nicht als grundsätzliches Hindernis betrachtet werden sollte.

Neben der unilateralen Einführung eines Bioenergiestandards ist es wichtig, auch Länder außer-

halb der EU, die Bioenergieträger in großem Umfang produzieren oder nutzen (z.B. die USA, Brasilien, Indien und Japan) in bi- und multilateralen Verhandlungen von der Wichtigkeit einer nachhaltigen Bioenergieproduktion zu überzeugen, da bei einem alleinigen Vorgehen der europäischen Staatengemeinschaft immer noch große Teile des Weltmarktes für Bioenergieträger unreguliert bleiben. Bi- und multilaterale Abkommen mit konkreten Kriterien für eine nachhaltige Produktion und Nutzung von Bioenergieträgern müssen also ebenfalls einen Beitrag zu einer nachhaltigen globalen Biomassestrategie leisten.

Aus Sicht des WBGU liegt aus diesen Überlegungen heraus ein viel versprechender Ansatz in einem gestuften Vorgehen, d.h. in der Kombination unilateraler verpflichtender Mindeststandards innerhalb der EU mit der Integration von Nachhaltigkeitsstandards in bi- und multilaterale Abkommen zwischen wichtigen Produktions- und Abnehmerländern von Bioenergieprodukten. Auf multilateraler Ebene könnte die Global Bioenergy Partnership (GBEP) ein wichtiges Gremium sein, um internationale Verhandlungsprozesse abzukürzen und bi- und multilaterale Politikformulierung zu globalen Standards zu beschleunigen (Kap. 10.3.2.2). Mit der politischen Unterstützung der G8 könnte auch erreicht werden, dass die Entscheidungen in politikrelevante Foren, Institutionen und Prozesse eingebracht und deren Implementierung gewährleistet ist. Längerfristig sollten die vom WBGU geforderten Standards für alle Arten von Biomasse gelten (Kap. 10.3.1; Kasten 10.3-5).

Solange jedoch kein weltweit einheitlicher Standard für alle Biomassearten existiert, muss realistischerweise gesehen werden, dass ein Standard bzw. Zertifizierungssystem für Bioenergieträger die Nachhaltigkeitsprobleme der Bioenergiegewinnung aus Energiepflanzen zwar verringern, aber nicht vollständig beseitigen kann, da indirekte Effekte zwar berücksichtigt, aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden können. Auch ist damit zu rechnen, dass selbst bei einer globalen Umsetzung von Bioenergiestandards in der Praxis durch Lücken im Kontrollsystem und aufgrund schwacher Institutionen in einigen Entwicklungs- und Schwellenländern die Nachhaltigkeit in der Bioenergieproduktion nicht vollumfänglich garantiert werden kann. Standardsetzung und Zertifizierung im Bioenergiesektor sind dennoch ein bedeutsames Instrument, um den Weg für die nachhaltige Gestaltung aller land- und forstwirtschaftlichen Praktiken weltweit zu bereiten. Auch unilaterale Standards können diese Funktion übernehmen, da sie in den Produzentenländern und in den land- und forstwirtschaftlichen Betrieben unweigerlich die Diskussion um die Produktionsmethoden anstoßen.

Noch gibt es keine etablierten Nachhaltigkeitsstandards für Biokraftstoffe bzw. Bioenergieträger aus nachwachsen Rohstoffen allgemein. Selbst wenn die bisherigen Politikprozesse zu Bioenergie auf EU-Ebene weiter dynamisch voranschreiten, wäre mit der Einführung eines EU-weiten Mindeststandards für Bioenergieträger wie vom WBGU gefordert vermutlich frühestens im Jahr 2012 zu rechnen. In der Zwischenzeit lägen 3-4 Jahre, in denen Bioenergieträger und insbesondere Biokraftstoffe weitgehend unreguliert in die EU importiert werden könnten. Um die nicht nachhaltige Produktion und Nutzung von Bioenergie zu begrenzen, sollte für die Übergangszeit jegliche Förderung von Bioenergieträgern, die den angestrebten Mindeststandards nicht genügt, unterlassen werden (Kap. 10.7).

Ein pragmatischer erster Schritt ist es, bei der Einführung eines gesetzlichen Mindeststandards für Bioenergieträger innerhalb der EU auf bestehende Zertifizierungssysteme für Biomasse außerhalb der energetischen Nutzung sowie auf die sich entwickelnden Zertifizierungssysteme im Bioenergiesektor (Tabelle 10.3-1) zurückzugreifen und diese im Sinne eines Metastandards auf die Bioenergiezertifizierung anrechenbar zu machen. Dies ist von der EU und in dem von Deutschland entwickelten Zertifizierungssystem (ISCC) vorgesehen. Die Anerkennung nationaler und freiwilliger Zertifizierungen würde auch den Zertifizierungsaufwand für ausländische Produzenten reduzieren und die Akzeptanz eines unilateralen Vorgehens erhöhen. Flankierende bi- und multilaterale Abkommen bezüglich einer international abgestimmten, nachhaltigen Förderung von Bioenergie (Kap. 10.7 und 10.8), zur Einrichtung von Schutzgebieten und Schutzgebietsnetzwerken (Kap. 10.5), zur Gewährleistung der weltweiten Ernährungssicherheit sowie Vereinbarungen zu Agrarflächen und zum Flächenverbrauch (Kap. 10.4) können die Effektivität der Zertifizierung weiter erhöhen.

10.4 Ansätze zur Sicherung der Welternährung im Rahmen einer nachhaltigen Bioenergiepolitik

10.4.1 Neue Herausforderungen durch die Bioenergienutzung

Die weltweit zunehmende Bedeutung der Bioenergienutzung bringt auch neue Herausforderungen für die Sicherung der Welternährung mit sich. Zwar haben Effizienzverbesserungen bei der traditionellen Biomassenutzung für energetische Zwecke positive Wirkungen auf die Ernährungslage, da Gesund-

heitsrisiken und Energiearmut reduziert werden (Kap. 10.2). Allerdings steht der Energiepflanzenanbau zugleich in direkter Flächenkonkurrenz mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion, so dass eine ungebremste Ausweitung des Energiepflanzenanbaus die Nahrungsproduktion zurückdrängen bzw. die Ernährungssicherheit erheblich gefährden kann. Dieses Verdrängungsproblem lässt sich teilweise über Standardsetzung und Zertifizierung, einschließlich Monitoring, regulieren (Kap. 10.3). Flankierend und unter Berücksichtigung sich ändernder Ernährungsmuster besonders in den wachsenden großen Schwellenländern sowie der sich abzeichnenden Wirkungen des Klimawandels muss die bisherige Politik zur Entwicklung der Landwirtschaft und des Handels mit Agrargütern überprüft und neu gestaltet werden. Diese Politikmaßnahmen müssen an den FAO-Richtlinien zum Recht auf Nahrung ausgerichtet werden (Eide, 2008).

Die Preise für Nahrungsmittel werden sich nach allgemeiner Einschätzung langfristig auf hohem Niveau einpendeln (Kap. 5.2.5.2). Für arme Bevölkerungsschichten in Entwicklungsländern, insbesondere in den Low Income Food Deficit Countries (LIFDCs), die den größten Teil ihres Einkommens für Nahrungsmittel ausgeben, ist dies eine existentielle Bedrohung. Die steigende Nachfrage nach Energiepflanzen ist dabei eine Ursachen für den Preisanstieg (vgl. Kap. 5.2). Expandiert der Bioenergiesektor weiterhin, werden induzierte Preiseffekte daher zunehmend die Ernährungssicherheit beeinflussen (Kap. 5.2). Abbildung 10.4-1 zeigt, dass viele der vom WBGU identifizierten Potenzialregionen in LIFDCs liegen, wo der Anbau von Energiepflanzen aus Gründen der Ernährungssicherheit nur mit besonderer Vorsicht erfolgen darf.

Angesichts der erheblichen Preisanstiege auf den Weltagrarmärkten und der immer engeren Kopplung von Agrar- und Energiemärkten haben viele Akteure der Entwicklungszusammenarbeit sowie des UN-Systems Strategie- und Aktionspläne entwickelt, um die sich abzeichnenden Risiken für die Ernährungssicherheit zu begrenzen (Kap. 10.6.4). Dabei herrscht weitgehend Konsens über zentrale Strategieelemente: Erforderlich sind erstens Maßnahmen, die in betroffenen Regionen die Voraussetzungen für die Nahrungsmittelproduktion kurzfristig und unmittelbar verbessern (z.B. Saatgut für die nächste Ernte; Kap. 10.6.2). Zweitens müssen umgehend Maßnahmen in Angriff genommen werden, welche die Rahmenbedingungen für Ernährungssicherheit und Nahrungsmittelproduktion mittel- und langfristig verbessern (z.B. Umstellung auf produktivere Anbausysteme; Kap. 10.6.3). Auf diese Weise

Abbildung 10.4-1
Potenzialregionen für Bioenergie mit Ländern, die zur Gruppe der LIFDCs zählen. Die Karte zeigt die räumliche Verteilung möglicher Anbauflächen von Energiepflanzen im Jahr 2050 für ein WBGU-Szenario mit geringem Agrarflächenbedarf und hohem Biodiversitätsschutz im unbewässerten Anbau (Szenario 3; Kap. 6.5).
Quelle: WBGU unter Verwendung von Daten aus Beringer und Lucht, 2008

soll einer Verschärfung der Nutzungskonkurrenzen vorgebeugt werden. Drittens müssen diese Aktivitäten aufeinander abgestimmt sein und sich gleichzeitig konsistent in andere Politikfelder wie den Klimaschutz (Kap. 10.2) und den Biodiversitätsschutz (Kap. 10.5) einfügen. Viertens muss die Abstimmung zwischen den einzelnen Politikfeldern auf Basis eines übergreifenden Leitbilds erfolgen, das auch beim Anbau von Energiepflanzen berücksichtigt wird. Die Forderung nach dem Vorrang der Nahrungs- und Futtermittelproduktion gegenüber dem Anbau von Energiepflanzen (Kap. 10.6.4) wäre aus Sicht des WBGU ein zentraler Bestandteil dieses Leitbilds.

10.4.2 Kurzfristige Maßnahmen zur Krisenbewältigung

Um rasche Erfolge bei der Krisenbewältigung zu erzielen, sind Aktivitäten erforderlich, die kurzfristig die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln in Krisengebieten erhöhen bzw. den Zugang von Bedürftigen zu Nahrung verbessern. Hinzu kommen produktionssteigernde Maßnahmen, die schnell und ohne großen Vorlauf in nationalen und internationalen Politiken umgesetzt werden können und eine rasche Wirksamkeit entfalten (z. B. Verteilung von Saatgut zur Sicherung der nächsten Ernte).

10.4.2.1 Transferprogramme (Safety-nets) und andere fiskalische Maßnahmen

Soziale Transferprogramme sehen geldnahe Transfers, etwa in Form von Essensmarken oder Gutscheinen, sowie direkte Einkommenstransfers für Bedürftige vor. Für eine effektive Anwendung solcher Programme muss die individuelle Bedürftigkeit festgestellt werden. Dies ist häufig mit hohen Kosten und organisatorischem Aufwand verbunden und erschwert die Anwendung in Staaten mit schwachen staatlichen Verwaltungsstrukturen. Gewisse Pauschalierungen bei der Festlegung des Kreises der Bedürftigen etwa nach Wohnort oder anderen einfach zu überprüfenden Kritierien können hier einen Ausweg bilden. Weitere Transfers werden über staatliche Beschäftigungs- und Ausbildungsprogramme geleistet, bei denen Arbeit mit Essen vergütet wird (food-for-work). Ähnlich wirken auch Schulspeisungsprogramme.

Transferprogramme erlauben grundsätzlich eine genauere Steuerung auf bedürftige Zielgruppen als allgemeine fiskalische Maßnahmen wie Steuersenkungen und direkte Subventionen. Diese Maßnahmen werden von vielen betroffenen Staaten dennoch eingesetzt, um dem Preisanstieg bei Nahrungsmitteln abzufedern. Nach einer Studie der Weltbank sahen zwischen 2007 und 2008 über 40 % von 58 untersuchten Entwicklungsländern Steuer- oder Zollsenkungen vor, über 30 % der Länder setzen Preissubventionen ein (World Bank, 2008c). Preissubventionen belasten die öffentlichen Haushalte der Länder und können nur sehr eingeschränkt an der Bedürftigkeit der Konsumenten ansetzen. Im schlimmsten Fall kollabiert eine derartige Politik aufgrund wachsender Staatsausgaben in Folge steigender Agrarpreise. Es drohen gesellschaftliche Konflikte und politische Krisen. Infolgedessen werden derartige fiskalische Maßnahmen von den internationalen Organisationen eher bemängelt. Die Verantwortung für den Einsatz und den Ausbau von Transferprogrammen liegt letztlich bei den betroffenen Staaten selbst. Im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit kann hierbei Unterstützung durch finanzielle Hilfen und Beratung entlang der Prinzipen des guten Regierungshandels geleistet werden.

10.4.2.2 Administrative Höchstpreise

Neben den fiskalischen Instrumenten und Ausgabenprogrammen setzen betroffene Länder zum Teil auch Höchstpreise als ordnungsrechtliche Maßnahmen ein: Administrativ wird ein maximaler Preis festgelegt, zu dem Nahrungsmittel bzw. Getreide vom Produzenten abgegeben werden müssen. So können kurzfristig Nahrungsmittel für breite Bevölkerungsschichten erschwinglich bleiben. Höchstpreise reduzieren allerdings die einzelwirtschaftliche Rentabilität der Agrarproduktion. Je nach Höhe der festgesetzten Preise und der Erträge aus alternativen Agrar- und Landnutzungen setzen sie Fehlanreize: Statt Nahrungsmitteln werden dann Energie- und andere Nutzpflanzen angebaut, wenn sich mit diesen Agrargütern, die nicht Nahrungsmittel sind, ein höherer Marktpreis erzielen lässt. Im Gegensatz dazu stoßen nachfrageorientierte Maßnahmen wie Transferprogramme Markteffekte an, die sich im Idealfall in Produktionsanreize übertragen und so die Landnutzungskonkurrenzen zu Gunsten der Ernährungssicherheit beeinflussen. So können Einkommenstransfers oder geldnahe Transfers mit Nachfragesteigerungen nach Nahrungsmitteln einhergehen und indirekt Produktionsanreize generieren. Diese Effekte sollten bei der Gestaltung nationaler Politiken berücksichtigt werden.

Kasten 10.4-1

Die Rolle der FAO in der globalen Bioenergiepolitik

Die FAO (UN-Sonderorganisation für Ernährung und Landwirtschaft, „Welternährungsorganisation") befasst sich bereits seit zwanzig Jahren mit dem Themenfeld Bioenergie. Ihre klassischen Arbeitsschwerpunkte liegen dabei auf der Nutzung von Brennholz und Agrarenergie, womit v.a. die Energieversorgung in ländlichen und abgelegenen Gebieten von Entwicklungsländern verbessert werden soll. Sie erarbeitet und verbreitet zu diesem Zweck Informationen über die Produktion, den Handel und die Nutzung von Bioenergie(pflanzen). Darüber hinaus unterstützt die FAO ihre Mitgliedstaaten auf lokaler und nationaler Ebene in technischen Fragen (z.B. bei der Entwicklung von Bioenergieprogrammen). Eine eigene Unterabteilung „Umwelt, Klimawandel und Bioenergie" (Environment Climate Change and Bioenergy Division) des 2007 neu eingerichteten Natural Resources Management and Environment Department nimmt ausdrücklich die Zusammenhänge von Bioenergie und Klimawandel in den Blick. Um die Kohärenz ihrer Bioenergiepolitik zu verbessern, hat die FAO zudem eine Inter-Departmental Working Group on Bioenergy eingesetzt. Sie soll das Profil der FAO zum Thema Bioenergie stärken und Handlungsprioritäten bestimmen. Zur Politikabstimmung über die eigene Organisation hinaus hat die FAO 2006 eine International Bioenergy Platform (IBEP) eingerichtet, die einer interdisziplinären und Regionen übergreifenden Zusammenarbeit zwischen einschlägigen Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft in den Bereichen nachhaltige Energie, Landwirtschaft und Umweltschutz dienen soll. Arbeitsziel der Plattform ist u.a. die Erarbeitung von Analysen zur Unterstützung von Entscheidungsträgern im Sinne einer nachhaltigen Produktion und Verwendung von Bioenergie, wobei die Milleniumentwicklungsziele als Referenzrahmen dienen. In diesem Zusammenhang ist auch die Global Bioenergy Partnership zu sehen, die 2006 von der UN Commission on Sustainable Development initiiert wurde und deren Sekretariat seither bei der FAO in Rom angesiedelt ist. Zielkonflikte zwischen der Bioenergiepolitik und der globalen Ernährungssicherheit thematisiert die FAO zudem in einem 2007 eingerichteten Bioenergy and Food Security Project (BEFS). Das gegenwärtig von Deutschland finanzierte BEFS-Projekt soll die Chancen und Risiken der Bioenergienutzung untersuchen und speziell mögliche Auswirkungen auf die Ernährungssicherheit identifizieren. Ob sich die derzeit in einer Krise befindende FAO in Fragen der Bioenergie als führende Institution etablieren kann, hängt auch wesentlich von dem Ergebnis des derzeit laufenden Reformprozesses innerhalb der UN-Sonderorganisation ab (Windfuhr, 2008).

10.4.2.3 Kurzfristige Hilfen für die kleinbäuerliche Produktion

Die Subsistenzlandwirtschaft bzw. kleinbäuerliche Agrarbetriebe, die vorrangig für den Eigenbedarf produzieren, profitieren kaum oder gar nicht von den steigenden Preisen für Nahrungsmittel. Hingegen sind sie oft von den Folgen der Energiepreisentwicklung negativ betroffen, da sich daran gekoppelt agrarische Produktionsmittel erheblich verteuern (v.a. Düngemittel). Um die kommenden Ernten zu sichern, müssen vor Beginn der nächsten Saison rasch die Grundlagen für einen verbesserten Zugang von kleinbäuerlichen Produzenten zu landwirtschaftlichen Betriebsmitteln geschaffen werden (Ressortarbeitsgruppe Welternährungslage, 2008; UN, 2008). Dies beinhaltet schnelle Hilfen für günstige Kredite, Saatgut, Düngemittel und Technik. Ziel muss es sein, die Produktivität der kleinbäuerlichen Landwirtschaft in den besonders betroffenen Regionen bereits bei der nächsten Aussaat zu verbessern. Hinzu kommen ad hoc Maßnahmen zur Verbesserung ländlicher und landwirtschaftlicher Infrastrukturen, wie Bewässerungssysteme, Straßen und Vermarktungsinfrastrukturen. Für Landlose eignen sich besonders Food-for-Work-Programme. Zu den kurzfristig einzuleitenden Maßnahmen zählen schließlich auch die Reduktion von Ertragsverlusten durch verbesserte Pflanzen- und Tiergesundheit sowie die Vermeidung von Nachernteverlusten durch Verbesserung der Lagerhaltung (UN, 2008). Die Vergabe günstiger Kredite oder andere Subventionen für die Bereitstellung agrarischer Produktionsmittel sind allerdings nur dann sinnvoll, wenn funktionierende Verteiler- und Beratungsnetzwerke vorhanden sind.

10.4.2.4 Exportbeschränkungen für Agrarprodukte

Um den Preisanstieg bei Nahrungsmitteln zu bremsen und interne Versorgungskrisen zu vermeiden, setzen viele Länder handelspolitische Maßnahmen ein, die je nach Bedeutung des Landes am Weltmarkt internationale Rückwirkungen auslösen. Zwischen 2007 und 2008 haben im Zuge der drastischen Nahrungsmittelpreisanstiege mindestens 20 % der in einer Studie der Weltbank untersuchten Schwellen- und Entwicklungsländer Exportbeschränkungen für Getreide und andere Agrarprodukte eingeführt (World Bank, 2008c). Zwar können solche Exportbeschränkungen kurzfristig für ein höheres Inlandsangebot sorgen, es werden aber gleichzeitig einheimische Agrarproduzenten benachteiligt, wodurch die Entwicklung des Agrarsektors im eigenen Land mittelfristig gehemmt wird. Darüber hinaus stellen Exportbeschränkungen keine zielgruppenorientierte Maßnahme dar, da von möglichen Preissenkungen im Inland nicht nur Einkommens-

schwache profitieren. Schließlich werden Preissteigerungen auf den Weltmärken verschärft, worunter besonders einkommensschwache Staaten leiden, die auf Nahrungsmittelimporte angewiesen sind (Rudloff, 2008; World Bank, 2008c). Exportbeschränkungen bei Nahrungsmitteln und Agrargütern können zwar durchaus WTO-konform sein (Art. XX GATT; Kap. 10.3.4.2), aber bislang gibt es keine näheren Bestimmungen bezüglich einer Eingrenzung auf bedürftige Länder oder ihrer zeitlichen Begrenzung. Um den konformen Einsatz zu kontrollieren und unverhältnismäßige Nebenwirkungen zu verhindern, sind Anwendungskriterien wie z.B. Auslöseschwellenwerte (Rudloff, 2008) zur Berücksichtigung der Wirkungen auf die Ernährungssicherheit in anderen Ländern relevant.

10.4.2.5
Abbau weiterer Handelsverzerrungen auf den Weltagrarmärkten

Agrarsubventionen, Mindestpreise und Importbeschränkungen werden bevorzugt in Industrie- und Schwellenländern angewendet und zur Einkommenssicherung der Landwirte eingesetzt. 2006 wurden in den OECD-Staaten 268 Mrd. US-$ Finanzhilfen an landwirtschaftliche Produzenten geleistet. Die gesamten Agrarsubventionen machen ca. 1,1 % des BIP der OECD-Staaten aus (OECD, 2007a). Ähnlich sieht es in mehreren Schwellenländern aus: China gab dafür im Jahr 2005 mehr als 2,4 % des BIP aus, Russland ca. 1 %, Brasilien ca. 0,8 % und Südafrika ca. 0,7 % (OECD, 2007). Viele ärmere Entwicklungsländer hingegen haben kaum Kapazitäten zur Förderung des Agrarsektors, weil die staatlichen Strukturen zu schwach und die finanziellen Mittel zu begrenzt sind. Häufig wird dieser Sektor sogar zu einer übermäßigen Besteuerung herangezogen (Weltbank, 2007).

Die genannten handelsverzerrenden Maßnahmen stehen in der Kritik, weil sie einheimische Anbieter protegieren und so den Marktzugang für wettbewerbsfähige Anbieter, u.a. aus Entwicklungsländern, verhindern. Subventionen können sich zwar anders als Importbeschränkungen auch positiv auf die globale Ernährungssicherheit auswirken, da sie dämpfend auf die Weltagrarpreise wirken, aber zugleich resultieren für die Landwirte, die mit den subventionierten Agrargütern konkurrieren, und damit letztlich auch für die dortige Ernährungssituation negative Folgen. Durch einen multilateral abgestimmten Abbau solcher verzerrenden Maßnahmen würden sich Wachstums- und Exportchancen für den Agrarsektor in Entwicklungsländern ergeben. Damit verbundene Produktionszuwächse würden so auch zur Versorgungssicherheit beitragen. Die Doha-Verhandlungsrunde der WTO bietet nach wie vor die Gelegenheit, um Rahmenbedingungen unter der Welthandelsordnung anzupassen und weiterzuentwickeln: Kurzfristig geht es darum, Verzerrungen zurückzuführen, indem die genannten Hemmnisse abgebaut werden. Auf lange Sicht sollte durch eine weitergehende Liberalisierung des Weltagrarhandels die Funktionsfähigkeit der Agrarmärkte unterstützt werden. Hierbei sind allerdings die unterschiedlichen Voraussetzungen und Bedürfnisse der Entwicklungsländer zu berücksichtigen (Kap. 10.6.3.3).

10.4.2.6
Finanzielle Hilfe, Nothilfe und Reform der Nahrungsmittelkonvention

Finanzielle Hilfen

Steigende Nahrungsmittelpreise sind ein gravierendes Problem vor allem für Entwicklungsländer, die auf Nahrungsimporte angewiesen sind und gleichzeitig über geringe finanzielle Mittel verfügen, um verteuerte Importe zu finanzieren. Angesichts des rasanten Anstiegs der Getreidepreise in der jüngeren Vergangenheit ist die Ernährungssicherheit in den Entwicklungsregionen, insbesondere in den so genannten Low-Income Food-Deficit Countries (LIFDC) Afrikas und Asiens, gefährdet (Karte 10.4-1). So haben sich nach Angaben der FAO die durchschnittlichen Kosten für Getreideimporte im Zeitraum 2007/2008 um 56 % verteuert, gegenüber 37 % im Zeitraum 2006/2007 und zuvor relativ stabilen Preisen zwischen 2000 und 2005 (FAO, 2008a). Die Weltbank und der IWF haben bereits kurzfristig auf die Krise reagiert und den Ländern, die aufgrund der hohen Nahrungsmittelpreise in Zahlungsbilanzschwierigkeiten geraten sind, Finanzhilfen zur Verfügung gestellt. Diese Programme sollten möglichst flexibel sein, um sich schnell dynamischen Entwicklungen anpassen zu können.

Nothilfe

In kritischen Situationen mit akutem Nahrungsmittelmangel werden international koordinierte Nothilfeaktivitäten durchgeführt (World Bank, 2008c). Der wichtigste internationale Akteur ist das UN-Welternährungsprogramm (WFP), dessen finanzieller Rahmen 2,8 Mrd. US-$ beträgt. Angesichts steigender Nahrungsmittelpreise und einer wachsenden Zahl von Bedürftigen wird das Programm absehbar zusätzliche finanzielle Ressourcen benötigen, um seine Aufgaben erfüllen zu können. Weltbank und IWF haben den kurzfristigen Bedarf auf zusätzliche 500 Mio. US-$ beziffert (Frühjahrstagung WB/IWF, 2008). Um für eine dauerhafte und ausreichende

Kasten 10.4-2

Der Weltagrarrat (IAASTD) als neuer Akteur der globalen Agrarpolitik

Das *International Assessment of Agricultural Science and Technology for Development*, (IAASTD oder „Weltagarrat") ist eine Initiative von Weltbank und FAO, die 2004 unter Beteiligung von Weltbank, FAO, GEF, UNDP, UNEP, UNESCO und WHO). Dessen Ausgestaltung und Arbeitsweise orientieren sich am *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) und dem *Millennium Ecosystem Assessment* (MA). Die Millenniumentwicklungsziele von einschlägiger landwirtschaftlicher Relevanz (Hunger- und Armutsbekämpfung, Verbesserung der ländlichen Lebensbedingungen und Gesundheit) stellen einen allgemeinen normativen Referenzrahmen. Der erste globale Bericht des IAASTD wurde von rund 400 Landwirtschaftsexperten (v.a. aus Wissenschaft und entwicklungspolitischer Praxis) erarbeitet und 2008 veröffentlicht. 57 Länder haben den Synthesebericht und die Zusammenfassung befürwortet. In der Summe fordert der Weltagrarrat einen grundlegenden Wandel der globalen Agrarproduktion, der die Bedürfnisse der armen und hungernden Bevölkerungsschichten berücksichtigt. Bislang scheint es dem Weltagrarrat allerdings an politischem Gewicht zu fehlen. So war auffällig, dass die Analysen und Empfehlungen des IAASTD im Rahmen der hochrangigen Konferenz zur Welternährungssicherheit im Jahr 2008 weitgehend ignoriert wurden. Auch der IAASTD konnte die großen Streitfragen der Agrarentwicklungspolitik nicht klären, wie etwa das Verhältnis von Kleinbauerstrategie und der Förderung großflächiger Farmwirtschaft, die Rolle grüner Gentechnik oder die Frage, ob LIFDCs auch auf Eigenversorgung setzen oder besser dem internationalen Handel vertrauen sollen. Aus Sicht des WBGU muss an diesen strittigen Punkten weiter gearbeitet werden, letztlich stellen sich hier Fragen von Gewichtung und Rollenverteilung.

Ausstattung des WFP zu sorgen, kann es angebracht sein, eigenständige Finanzierungsquellen für das WFP zu etablieren. Im Kontext global wachsender Landnutzungskonkurrenzen kämen etwa in Anlehnung an das Verursacherprinzip Abgaben auf Landnutzungen in Betracht, die weder der Nahrungsmittelproduktion noch dem Biodiversitätsschutz dienen, also z.B. der Anbau von Energiepflanzen.

Reform der Nahrungsmittelhilfekonvention

Die Maßnahmen müssen begleitet werden durch eine Reform der im Jahr 1999 abgeschlossenen internationalen Konvention über Nahrungsmittelhilfe. Insbesondere sollten im Rahmen dieser Konvention die Steuerungsmöglichkeiten verbessert, Bedarfsanalysen eingeführt und die Nahrungsmittelnothilfe in Strategien zur Ernährungssicherung integriert werden. In diesem Zusammenhang geht der parteiübergreifende Antrag im Deutschen Bundestag (März 2008) für eine Neuverhandlung der Nahrungsmittelhilfekonvention in die richtige Richtung. Bislang war es das wichtigste Ziel der Konvention, dass jeder der 23 beteiligten Industriestaaten pro Jahr eine bestimmte Quote an Nahrungsmitteln u.a. für akut Hungernde zur Verfügung stellt. Bei der Neuverhandlung der Konvention sollten Vorkehrungen getroffen werden, um künftig zu verhindern, dass subventionierte Produktionsüberschüsse der Industrieländer zu Dumpingpreisen in Entwicklungsländer geliefert und dadurch die dort ansässigen Nahrungsmittelproduzenten geschädigt oder verdrängt werden. Bei akuten Hungerkrisen müssen aus Sicht des WBGU verschiedene Instrumente zum Tragen kommen. Dazu gehören beispielsweise Geldzahlungen, falls auf den lokalen Märkten ausreichend Lebensmittel verfügbar sind. Weiterhin ist es notwendig, dass die Soforthilfe in langfristige Ernährungssicherung mündet. Die Nahrungsmittelhilfe sollte im Wesentlichen auf akute Notlagen beschränkt bleiben. Bei diesen Maßnahmen sind vor allem die FAO, IFAD und das WFP einzubeziehen (Ressortarbeitsgruppe Welternährungslage, 2008).

10.4.3 Mittel- und langfristige wirkende Maßnahmen

Weil die Faktoren, die zu den Preissteigerungen bei Nahrungsmitteln beigetragen haben, auf Dauer wirksam sein werden (Bevölkerungswachstum, Änderung von Ernährungsweisen, Energiepreise, wachsende Nutzungskonkurrenzen usw.), muss heute auch mit Maßnahmen zur mittel- und langfristigen Verbesserung der globalen Ernährungslage begonnen werden. Im Vordergrund stehen dabei Instrumente zur Stärkung des landwirtschaftlichen Produktionspotenzials, Reformen des Weltagrarhandels und eine verstärkte Förderung der Agrarforschung.

10.4.3.1 Bioenergiestrategien und Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen

Der weltweit zunehmende Anbau von Energiepflanzen kann Landnutzungskonkurrenzen insbesondere mit der Nahrungsmittelproduktion verschärfen (Kap. 5.2), bietet aber vielen Ländern gleichzeitig eine Möglichkeit zur Minderung der Ausgaben für den Import fossiler Energieträger. Eine große Zahl von Schwellen- und Entwicklungsländern hat aus diesem Grund bereits nationale Strategien zur verstärkten Nutzung von Bioenergie, vor allem Biokraftstoffen, beschlossen (Kap. 4.1.2). Darunter befinden sich

auch Länder, die zu den LIFDCs zählen (z.B. Senegal, Mali, Ghana, Nigeria, Burkina Faso, Kenia, Tansania, Malawi, Mosambik, Simbabwe). Ob negative Folgen eintreten, hängt letztlich von Art und Umfang der Bioenergienutzung ab sowie von den Möglichkeiten einer nachhaltigen Biomasseproduktion. Kritisch wird dabei vor allem der Anbau von Energiepflanzen auf Ackerflächen gesehen. Die knappen Flächenreserven und die Notwendigkeit, die globale Nahrungsmittelproduktion bis 2030 um rund 50 % zu steigern, machen es notwendig, dass der Anbau von Energiepflanzen begrenzt wird. Vor allem aber muss parallel eine Steigerung der Nahrungsmittelproduktion, insbesondere durch eine Erhöhung der Flächenproduktivität, stattfinden. Der Anbau von Energiepflanzen setzt aus Sicht des WBGU eine integrierte Bioenergie- und Ernährungssicherungsstrategie voraus, bei der die Ernährungssicherheit Vorrang hat. Grundsätzlich kann der Anbau von Energiepflanzen im Kontext der dezentralen ländlichen Energieversorgung seinen Platz haben, wenn der Anbau vorwiegend auf marginalen und degradierten Flächen, in Agroforstsystemen oder in einer Mischkultur erfolgt (Kap. 8.2 und 10.2). Zwar kann letztlich nur regional- und kontextspezifisch und unter Einbeziehung aller beteiligten Akteure abgewogen werden, wo der Anbau von Energiepflanzen nachhaltig erfolgen kann. Der Anbau in ärmeren Entwicklungsländern, die Nettoimporteure von Agrargütern und Nahrungsmitteln sind (LIFDCs), sollte jedoch stets besonders kritisch geprüft werden. Grundsätzlich bedarf es angepasster nationaler Bioenergiestrategien und der Einhaltung entsprechender Standards für eine nachhaltige Bioenergienutzung (Kap. 10.5). Dabei können die regionalen Entwicklungsbanken eine wichtige Rolle übernehmen.

Ein kontrollierter Ausbau der Bioenergie muss aus Sicht des WBGU mit weltweiten Anstrengungen zur Stärkung der Landwirtschaft in den Entwicklungsländern einhergehen. Wird dies versäumt und die Landwirtschaft in Entwicklungsländern weiterhin vernachlässigt, so ist davon auszugehen, dass die Landnutzungskonkurrenzen extrem zunehmen und die Ernährungssicherheit gefährdet wird.

10.4.3.2 Förderung des kleinbäuerlichen Agrarsektors in Entwicklungsländern und Agrarforschung

Die Landwirtschaft in ländlichen Regionen von Entwicklungsländern kann einen wichtigen Beitrag zur Verhinderung von Ernährungskrisen leisten (IAASTD, 2008Kap. 5.2). Sie wurde aber in der internationalen Zusammenarbeit seit Jahren vernachlässigt, was zu den weltweit steigenden Nahrungsmittelpreisen beigetragen hat. Im Einzelnen fehlt gerade Kleinbauern häufig ein sicherer Zugang zu Kapital und landwirtschaftlichen Betriebsmitteln, wie z.B. Saatgut, Dünger oder Krediten. Die von Weltbank und FAO in Auftrag gegebene „Internationale Bewertung von landwirtschaftlichem Wissen, Forschung und Technologie für Entwicklung“ (International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development oder kurz „Weltagrarrat“) fordert in diesem Sinne einen Wechsel in der Agrarpolitik, um der Komplexität von Agrarsystemen in ihren unterschiedlichen sozialen und ökologischen Kontexten besser gerecht zu werden (Kiers et al., 2008; Butler, 2008). Eine Erfolg versprechende globale Agrarentwicklungsstrategie, so IAATSD, muss an den Lebensbedingungen der insgesamt rund 400 Mio. Kleinbetriebe unter 2 ha ansetzen. Unter diesen Umständen kann eine Förderpolitik durch die zweckgebundene Subventionierung landwirtschaftlicher Betriebsmittel oder durch den Aufbau von breitenwirksamen Agrarkreditsystemen sinnvoll sein, sofern Nachhaltigkeitskriterien eingehalten werden (Sachs, 2008). Dies kann nur gelingen, wenn die Entscheidungsträger in den Entwicklungsländern der Entwicklung des ländlichen Raumes auch eine entsprechende Priorität einräumen überwinden. Hier sollte die multilaterale Entwicklungszusammenarbeit, die die ländliche Entwicklung in der vergangenen Dekade ebenfalls vernachlässigt hat, eine grundlegende Neuorientierung unterstützen. Zur Förderung des kleinbäuerlichen Sektors gilt es mittel- und langfristig folgende Maßnahmen zu ergreifen (Ressortarbeitsgruppe Welternährungslage, 2008; UN, 2008):

- Ein umsichtiger Ausbau der Bioenergie, um Nutzungskonkurrenzen zu vermeiden: Dazu sollten baldmöglichst verbindliche Nachhaltigkeitsstandards und Zertifizierungssysteme vereinbart und ein wirksames Monitoring sichergestellt werden (Kap. 10.5).
- Intensivierung der Agrarforschung entlang der gesamten landwirtschaftlichen Produktionskette, einschließlich der Zulieferindustrien, um Ertragssteigerungen zu erreichen.
- Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität durch verstärkte Investitionen, insbesondere in ländliche Entwicklung, nachhaltige kleinbäuerliche Landwirtschaft und Pflanzenzüchtung.
- Verbesserung institutioneller und rechtlicher Rahmenbedingungen in Entwicklungsländern durch grundlegende Strukturveränderungen über den Agrarsektor hinaus. Dazu zählen v.a. die Verbesserung von Rechtssicherheit, die Schaffung von Instrumenten zur Markt- und Preistransparenz sowie andere an Armutsbekämpfung orientierte (sozial)politische Maßnahmen.

10.4.3.3 Weitergehende, differenzierte Liberalisierung der Weltagrarmärkte

Mit der ins Stocken geratenen Doha-Verhandlungsrunde sollten Agrarsubventionen in den Industrieländern und andere Handelshemmnisse kurzfristig deutlich reduziert werden, da insbesondere Exportsubventionen für Agrargüter sowie Agrarbeihilfen der Industrieländer Wettbewerbsverzerrungen zu Lasten der Anbieter aus den Entwicklungsländern verursachen und die Abhängigkeit dieser Länder von Agrarimporten erhöhen (Kap. 10.6.2.5). Darüber hinaus muss mittel- und langfristig eine weitergehende Liberalisierung des Weltagrarhandels erreicht werden, um die Funktionsfähigkeit der Agrarmärkte zu verbessern. Damit würden die Absatzmöglichkeiten und die Produktionsanreize für viele Entwicklungsländer steigen, die über komparative Vorteile im Landwirtschaftssektor verfügen.

Agrarsubventionen für die industrielle landwirtschaftliche Produktion, wie z.B. in Europa, sind aus Sicht des WBGU auch deshalb problematisch, weil hier in vielen Fällen Nachhaltigkeitsdimensionen verletzt werden. Beispielhaft hierfür sind ökologische Schäden, die häufig mit einer agroindustriellen Produktionsweise einhergehen (FOES, 2008; OECD, 2005). Auch bei Nahrungsmittelengpässen ist die Subventionierung der lokalen Agrar- und Nahrungsmittelproduktion im großen Maßstab in der Regel wenig effizient, solange ausreichend Nahrungsmittel aus umliegenden Regionen beschafft werden können. Außerdem kann bei einer subventionierten Produktion von Agrargütern nicht zwingend auf die Verwendung der Produkte für Nahrungs- oder Energiezwecke geschlossen werden, so dass zur Sicherstellung der unmittelbaren Verwendung für die Nahrungsproduktion zusätzliche Kontrollen erforderlich wären. Sofern Bioenergie gefördert wird und dies zur Verdrängung der Nahrungsmittelproduktion beiträgt, ist es effizient, die Bioenergieförderpolitik zu reduzieren anstatt einen Subventionswettlauf zwischen dem Anbau von Nahrungsmitteln und von Energiepflanzen zu initiieren.

Besondere Voraussetzungen und Bedürfnisse der Entwicklungsländer

Entwicklungsländer sind je nach ihrer agrar- und ernährungspolitischen Ausgangslage von einem Abbau der Agrarsubventionen in unterschiedlicher Weise betroffen. Durch den Subventionsabbau werden die Weltmarktpreise zunächst ansteigen. Das ist unter dem Blickwinkel der Ernährungssicherheit auf der einen Seite vorteilhaft, da dadurch Produktionsanreize entstehen und, wenn die Preissteigerungen die Landwirte erreichen, daraufhin die landwirtschaftliche Produktion in den meisten Entwicklungsländern steigen wird. Nettoagrarexporteure unter den Entwicklungsländern profitieren somit unmittelbar von dem Subventionsabbau, insbesondere wenn zugleich weltweit die Importhürden eliminiert würden. Nettoimporteure von Nahrungsmitteln sind hingegen kurz- bis mittelfristig Verlierer des Subventionsabbaus. Besonders gravierend stellt sich die Lage für ärmere Entwicklungsländer dar, die „Low-Income Food-Deficit Countries (LIFDC)“. Zur Abfederung der negativen Wirkungen bedarf es kurzfristig internationaler finanzieller Unterstützungs- und Ausgleichsmechanismen, damit die LIFDC in die Lage versetzt werden, ihre Bevölkerung ausreichend zu ernähren (WBGU, 2004a). Entsprechende Zusagen insbesondere der Industrieländer wurden bereits beim Abschluss der Uruguay-Runde des GATT in der Marrakesch-Erklärung gemacht („Ministerial Decision on Measures Concerning the Possible Negative Effects of the Reform Programme on Least-Developed and Net Food-Importing Developing Countries“). Bei einem grundsätzlich empfehlenswerten, aber für die LIFDC kurz- bis mittelfristig nur schwer verkraftbaren Fortschreiten des weltweiten Agrarsubventionsabbau würde es noch dringlicher, dass ausreichend Ausgleichsmittel zur Verfügung gestellt werden.

Multilaterale Importliberalisierung und Subventionsabbau können indes nicht nur in LIFDC zu steigender Ernährungsunsicherheit führen. Für mehrere Entwicklungsländer, die Importbeschränkungen für Agrargüter vorsehen und selber Agrarsubventionen leisten, sind weitergehende Liberalisierungszusagen insoweit problematisch, als sie der Nahrungsmittelerzeugung im eigenen Land erheblichen Schaden zufügen könnten und gerade kleine Landwirte nicht in der Lage wären, mit billigen – weil nicht mehr beschränkten – Importen zu konkurrieren und zugleich auf Beihilfen zu verzichten. Als Ausweg können Ausnahmen von einer allgemeinen Liberalisierung für einen Kreis von ärmeren Entwicklungsländern vorgesehen werden. Solche Ausnahmeregelungen wurden zuletzt auf der 7. WTO-Ministerkonferenz im Juli 2008 erneut diskutiert und beziehen sich auf die Möglichkeit der Entwicklungsländer, so genannte Spezielle Produkte, wie Agrarprodukte, die für die Ernährungssicherheit besonders wichtig sind, vom Zollabbau (teilweise) auszunehmen, sowie durch den Speziellen Schutzmechanismus als Reaktion auf vorübergehende Importsteigerungen oder Preisverfall Zusatzzölle auf Agrarimporte erheben zu können (Deutscher Bundestag, 2008). Beide Instrumente können damit der Unterstützung nationaler Strategien zur Förderung des kleinbäuerlichen Sektors und einer nachhaltigen Nahrungsmittelproduktion dienen. Betriebsmittelsubventionen

Kasten 10.4-3

Zentrale Empfehlungen der Ressortarbeitsgruppe Welternährungslage

Kurzfristige Massnahmen:
- Aufstockung der humanitären Soforthilfe, Not- und Übergangshilfe, insbesondere der Nahrungsmittelhilfe
- Sicherstellen, dass Nahrungsmittel- und Einkommenstransfers die sozial Schwächsten erreichen
- Zugang zu landwirtschaftlichen Betriebsmitteln verbessern
- Ausfuhrbeschränkungen sofort aufheben
- Doha-Runde zum Erfolg führen (v.a. durch Abbau von Exportsubventionen und -förderung)
- Haushalts- und Zahlungsbilanzungleichgewichte bekämpfen

Mittel- und langfristig wirksame Massnahmen:
- Verbesserung institutioneller und rechtlicher Rahmenbedingungen in Entwicklungsländern
- Steigerung der nachhaltigen Nahrungsmittelproduktion
- Verstärkte Investitionen in eine nachhaltige Landwirtschaft
- Intensivierung der Agrarforschung
- Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen durch verantwortungsbewussten Ausbau der Bioenergie
- Einführung verbindlicher Nachhaltigkeitsstandards und effektiver Zertifizierungssysteme
- Verbesserung von Frühwarnsystemen

für kleinbäuerliche Produzenten könnten ebenfalls vom Liberalisierungsprozess vorerst ausgenommen werden. Ausnahmeregelungen werden im Kontext einer „Development Box“ unter dem WTO-Agrarabkommen diskutiert (Murphy und Suppan, 2003). Angesichts des aktuellen Dissenses in der WTO-Verhandlungsrunde über die Ausgestaltung der Ausnahmeregelungen plädiert der WBGU für einen angemessenen Spielraum, um Förderstrategien des kleinbäuerlichen Sektors abzusichern zu können. Jedoch soll der Kreis der Anspruchsberechtigen Länder auf die ärmsten Entwicklungsländern begrenzt werden (Rudloff, 2008).

Internationale Vereinbarungen zur Nutzung von Agrarflächen für die Nahrungsproduktion

Konzeptionell sind internationale Abkommen denkbar, in welchen Staaten vereinbaren, für eine ausreichende Nahrungsmittelproduktion Sorge zu tragen. Dabei ginge es anders als bei der Nahrungsmittelhilfekonvention (Kap. 10.4.2.6) nicht um Quoten für Nahrungsmittelhilfen, sondern umfassender um Quoten für eine Mindestproduktion an Nahrungsmitteln oder um Zusagen, welcher Anteil an (nationalen) Flächen für die Nahrungsmittelproduktion bereitgehalten wird. Eine entsprechende Koordination könnte unter dem Dach der UN, möglicherweise der FAO, angesiedelt werden). Als Ausgangspunkt für die Verhandlung eines Nahrungsmittelabkommens, das auf Produktionsflächen abstellt, bietet es sich an, dass die internationale Staatengemeinschaft eine Mindestfläche für die Nahrungsproduktion festlegt. Dieser Wert sollte in regelmäßigen Abständen (z.B. alle 10 Jahre) je nach Entwicklung der Flächenproduktivität und der Weltbevölkerung an die ernährungspolitischen Erfordernisse angepasst werden. Wenn die für die Nahrungsmittelproduktion tatsächlich bewirtschaftete Fläche unter diese kritische Schwelle fällt, sollten Mechanismen in Kraft treten, die bewirken, dass der für die Nahrungsproduktion angenommene Mindestflächenbedarf so rasch wie möglich wieder erreicht wird. Zwar dürfte ein solcher Ansatz derzeit politisch schwer durchsetzbar sein, zumal er mit einem hohen administrativen Aufwand verbunden wäre; das Konzept könnte aber zukünftig an Bedeutung gewinnen und sollte deshalb in internationalen Politikforen frühzeitig diskutiert werden.

10.4.3.4 Förderung des Bewusstseins über die Folgen unterschiedlicher Ernährungsstile

Die in vielen Weltregionen beobachtbare Änderung der Ernährungsgewohnheiten (Kap. 5.2.3) trägt zur Verschärfung der globalen Flächenkonkurrenzen bei. Der zunehmende Konsum von flächenintensiv produzierten Fleisch- und Milchprodukten in Industrieländern sowie zunehmend auch in Schwellenländern ist Haupttreiber dieser Entwicklung. Es wird angenommen, dass diese geänderten Ernährungsmuster bis 2030 ca. 30 % der erforderlichen Produktionssteigerungen für Nahrungsmittel absorbieren (Kap. 5.2). Es ist also absehbar, dass sich die Probleme der Ernährungssicherung in den ärmsten Ländern verschärfen, wenn sich dieser flächenintensive Ernährungsstil verfestigt und aufgrund der wirtschaftlichen Entwicklung in schnell wachsenden Ökonomien wie China und Indien weiter verbreitet. Rückwirkungen ergeben sich auch für die energetische Biomassenutzung. Flächenintensive Ernährungsstile reduzieren bei einem angestrebten Vorrang der Landnutzung für die Nahrungsmittelproduktion (Kap. 10.5 und 10.6.4) die globalen, nachhaltigen Potenziale für die Bioenergie. Darüber hinaus würden die wirtschaftlich starken Länder ihren Nahrungsbedarf auch bei

steigenden Preisen decken können, aber arme Länder gerieten aber in die Gefahr, zunehmend unter Ernährungskrisen zu leiden. Insbesondere in Industrieländern gibt es zwar Initiativen von Seiten des Gesundheitssektors, um Verbraucher über die Wirkungen der Ernährung auf die persönliche Gesundheit zu informieren und zu beraten, aber die Zusammenhänge zwischen der Bedeutung von individuellen Essgewohnheiten und globaler Landnutzung und Ernährungssicherheit werden bislang kaum in der Öffentlichkeit kommuniziert, bzw. werden durch gesundheitliche Aspekte überlagert und dringen so auch nicht in das Bewusstsein der Verbraucher. Aufgrund des gewachsenen Umweltbewusstseins der Verbraucher ist jedoch durchaus eine Nachfrage nach Informationen über die Umweltfolgen der Nahrungsmittelproduktion entstanden. Diese Entwicklung wird durch staatliche Rahmensetzungen zur Zertifizierung von Produkten der ökologischen Landwirtschaft unterstützt. Beide Trends könnten die Basis bilden für eine Weiterentwicklung in Richtung auf eine Aufklärung der Verbraucher über die Folgewirkungen ihrer Ernährungsstile. Gelingt auf diesem Weg eine Bewusstseinsbildung, die letztlich zur Verhaltensänderung motiviert, dann kann so den sich verschärfenden Landnutzungskonkurrenzen entgegen gewirkt werden. Aktivitäten hierzu können dezentral von privaten Akteuren, wie Einzelhandelsketten oder Nichtregierungsorganisationen, und von öffentlichen Stellen durchgeführt werden. Ebenso ist es möglich, dass Initiativen auf internationaler Ebene z.B. im Umfeld der UN-Organisationen angestoßen werden. Aufklärungskampagnen werden indes kaum ausreichen, um weltweit nachhaltige Ernährungsmuster herbeizuführen. Daher werden mittel- bis langfristig eingriffsintensivere Instrumente auf die (internationale) Tagesordnung kommen müssen. Dazu zählen neben Standards auch Internalisierungsmaßnahmen, etwa Abgaben auf flächenintensiv produzierte Nahrungsmittel.

Flächeninanspruchnahme für Pro-Kopf-Nahrungsmittelverbrauch

Initiativen zur Beeinflussung der Ernährungsgewohnheiten können durch internationale Vereinbarungen über die Flächeninanspruchnahme für den Pro-Kopf-Verbrauch von Nahrungsmitteln unterstützt werden, d.h. indirekt einen wichtigen Beitrag zur Verschärfung der globalen Flächenkonkurrenzen leisten Im Rahmen einer zwischenstaatlichen Koordination würde sich zunächst für den einzelnen Staat die Aufgabe stellen, die Flächen quantitativ zu erfassen, die im In- und Ausland für die Produktion der im Inland konsumierten Nahrungsmittel bislang eingesetzt wurden. Für eine Operationalisierung der Flächeninanspruchnahme kann das Konzept des Ökologischen Fußabdrucks den Ausgangspunkt bilden (Hails, 2006). Zu berücksichtigen sind aber die methodische Kritik an diesem Konzept sowie die Tatsache, dass nicht nur Flächennutzungen für die Nahrungsmittelproduktion, sondern andere Flächen- und Biomassenutzungen in die Ermittlung des Ökologischen Fußabdrucks eingehen (IMV, 2002; Venetoulis und Talberth, 2008). Voraussetzung sind demnach eindeutige Anrechnungs- und Inventarisierungsregelungen, welche geeignet sind, den mit internationalen Handelsströmen von Nahrungsmittel verbundenen Flächenverbrauch zuverlässig und dauerhaft zu erfassen. Dies erfordert ein sehr hohes Maß an Erfassungs- und Monitoringaufwand sowie auch die Bereitschaft zu Pauschalierungen. Auf Basis einer dann geeigneten Datenlage ließen sich Länder mit einer deutlich überdurchschnittlichen Pro Kopf-Inanspruchnahme identifizieren, so wie es bei der Erfassung von Treibhausgasemissionen unter der UNFCCC praktiziert wird. Ein Handlungsdruck für die so identifizierten Länder ließe sich daraus ableiten, dass global jedem einzelnen Menschen ein Recht an der gleichen Menge an natürlichen Ressourcen zur Bedürfnisbefriedigung, d.h. zur ausreichenden Nahrungsmittelversorgung (sowie zur energetischen Verwendung) zugestanden wird (von Koerber et al., 2008). Die darüber liegenden Länder müssten in nationalen Strategieprogrammen darlegen, mit welchen Maßnahmen sie ihre Pro Kopf-Inanspruchnahme senken wollen. In internationalen Foren könnte dazu ein Monitoring der Programmerfolge und ein Erfahrungsaustausch über Programmelemente vorgesehen werden. Letztlich müsste bei der Umsetzung solcher Strategien der Pro-Kopf-Verbrauch von Nahrungsmitteln, die flächenintensiv produziert werden, in den identifizierten Ländern stabilisiert oder schrittweise zurückgeführt werden. Zu überlegen ist, inwieweit ein solches Regime, das zunächst nur für den Flächenverbrauch in der Nahrungsmittelproduktion ausgelegt ist, als Grundlage für ein globales Landnutzungsmanagement für zusätzliche Biomassenutzungen, vor allem Bioenergie, dienen bzw. dahingehend erweitert werden könnte. In einem solchen globalen Regime wären auch Mechanismen zur Flexibilisierung der entsprechenden Umsetzungsverpflichtungen vorstellbar, wobei konzeptionell die flexiblen Mechanismen der Klimapolitik hierfür Modell stehen könnten. So wäre etwa denkbar, dass die übermäßige Inanspruchnahme in einem Biomassesektor bzw. in einem Land durch nicht beanspruchte „Nutzungsreserven“ in einem anderen Sektor und/oder in einem anderen Land (vorübergehend) ausgeglichen werden könnte. Konzeptionell könnten die flexiblen Mechanismen der Klimapolitik hierfür Modell stehen.

10.4.3.5 Aufbau von Frühwarn- und Risikomanagementsystemen

Frühwarn- und Monitoringkapazitäten stärken

Um künftig besser auf Krisenfälle vorbereitet zu sein, wird ein effektives Frühwarnsystem benötigt. Die vorhandenen Monitoringkapazitäten, z.B. bei der FAO und dem Welternährungsprogramm (WEP), sollten in ihrer Effizienz gestärkt und vernetzt werden (Ressortarbeitsgruppe Welternährungslage, 2008). Der WBGU sieht darüber hinaus einen wachsenden Bedarf zur rechtzeitigen Erkennung von Risiken für die Ernährungssicherheit durch Nutzungskonkurrenzen mit dem Anbau von Energiepflanzen.

Massnahmen zur Senkung der Volatilität von Nahrungsmittelpreisen prüfen

Die zu beobachtende Korrelation zwischen (Bio-) Energie- und Nahrungsmittelpreisen dürfte die Volatilität der Nahrungsmittelpreise weiter erhöhen. Häufige starke Preisschwankungen nach unten erhöhen die Investitionsunsicherheit bei landwirtschaftlichen Produzenten und treffen insbesondere den kleinbäuerlichen Sektor, der kaum über Rücklagen verfügt und gegen Preisrisiken nicht abgesichert ist. Starke Preisschwankungen nach oben gefährden wiederum Nettonahrungsmittelkonsumenten mit niedrigem Einkommen. Hier gilt es zu prüfen, ob ein international koordinierter Ausbau von Nahrungsmittelreserven einen gangbaren Weg darstellt, um bei einem kurzfristig signifikanten Preisanstieg das Weltmarktangebot zu erhöhen bzw. bei einem Absturz der Preise Nachfrage zu generieren.

10.4.4 Prioritäre Handlungsfelder zur Sicherung des Vorrangs für Nahrungsproduktion und Ernährungssicherheit

Die internationale Staatengemeinschaft hat erkannt, dass die weitere Entwicklung der globalen Landwirtschaft und insbesondere die weltweite Nahrungsmittelproduktion künftig vor enormen und bisher unterschätzten Herausforderungen stehen. Der Anbau von Energiepflanzen und die dadurch verschärfte Flächennutzungskonkurrenz stellen eine dieser Herausforderungen dar. In der ersten Jahreshälfte 2008 hat die Politik auf die weltweite Steigerung der Agrarpreise reagiert und das Thema auf der „High Level Conference on World Food Security: The Challenges of Climate Change and Bioenergy“ auf die internationale Bühne gehoben. Hierbei wurde deutlich, dass die Staatengemeinschaft von einem globalen Konsens zur nachhaltigen Regelung der Bioenergienutzung noch weit entfernt ist, dass aber gleichzeitig ein dringender Handlungsbedarf besteht, da der weltweite Energiehunger ohne Regelungen den Nutzungsdruck auf die fruchtbaren Flächen deutlich erhöhen wird. Die von UN-Generalsekretär Ban Ki moon eingerichtete „Task Force on the Global Food Crisis“ hat dazu ein Strategiepapier für die Bewältigung der Preiskrise bei Nahrungsmitteln entworfen. Darin sind auch Elemente zur Entwicklung eines internationalen Konsenses für nachhaltige Biokraftstoffe aufgelistet. Empfohlen werden u.a. die Entwicklung von Richtlinien zur Minimierung negativer Effekte des Anbaus von Energiepflanzen auf die globale Nahrungssicherheit und den Umweltschutz, die Vorbereitung eines gemeinsamen Bezugsrahmens zur Entwicklung eines Zertifizierungsprozesses für nachhaltige Bioenergienutzung, die Förderung privater Investitionen in die Agrarenergieproduktion in Entwicklungsländern, die Neubewertung von Subventionen für den Anbau von Energiepflanzen sowie die Überprüfung der Methoden zur Bewertung und Beobachtung der Wirkungen des Energiepflanzenanbaus (UN, 2008). In Reaktion auf aktuelle Entwicklungen hat die Weltbank zudem die *Global Food Crisis Response Facility* eingerichtet.

Auch Deutschland hat mit der Ressortarbeitsgruppe „Welternährungslage“ einen Bericht an das Bundeskabinett vorgelegt (Ressortarbeitsgruppe Welternährungslage, 2008; Kasten 10.4-3):

Als Antwort auf die kritische Entwicklung der Welternährungslage ist laut der Ressortarbeitsgruppe Welternährungslage eine umfassende und auf Dauer angelegte koordinierte Strategie erforderlich, die zwischen den Staaten und internationalen Institutionen abgestimmt werden muss. Jetzt bleibt als nächste große Aufgabe, die Umsetzung dieser Maßnahmen politisch konsequent zu fördern. Über diese Maßnahmen hinaus sieht der WBGU vier prioritäre Handlungsfelder, die zur Sicherung der Welternährung vor dem Hintergrund des weltweiten Bioenergiebooms von besonderer Bedeutung sind:

1) Der Anbau von Energiepflanzen muss in integrierte nationale Bioenergie- und Ernährungssicherungsstrategien eingebunden werden, die Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungsproduktion vermeiden. Besonders wichtig ist dies für die Gruppe der Low Income Food Deficit Countries (LIFDCs). Parallel müssen mit dem Anbau von Energiepflanzen die Flächenproduktivität der Nahrungserzeugung und die Nahrungsproduktion erhöht werden. Diese nationalen Anstrengungen sollten im regionalen Rahmen, insbesondere durch die regionalen Entwicklungsbanken unterstützt werden. Somit wachsen Bioenergie-, Agrar- und Entwicklungspolitik zusammen.

2) Der stark steigende Druck auf die Landnutzung durch veränderte Ernährungsweisen durch die flächenintensiven Ernährungsmuster in Industrieländern und deren Ausweitung in dynamisch wachsenden großen Schwellenländern ist eine heute noch weitgehend unterschätzte, große Herausforderung für die Zukunft, die mehr Aufmerksamkeit verdient. Gleichzeitig werden durch die Ausbreitung westlicher Ernährungsmuster auch die Potenziale für den nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen eingeschränkt. Zudem steigt der Nutzungsdruck auf Flächen, besonders in LIFDCs, der durch die wachsende Energie- und Nahrungsmittelnachfrage aus anderen Ländern noch verstärkt wird. Schon heute kann man beobachten, dass in Afrika großflächig Agrarland von ausländischen Investoren aufgekauft wird (Länderfallstudien; Kap. 8.2).

3) Um künftig besser auf Krisenfälle vorbereitet zu sein, wird ein effektives Frühwarnsystem benötigt. Die vorhandenen Monitoringkapazitäten, z.B. bei der FAO und dem Welternährungsprogramm, sollten in ihrer Effizienz gestärkt und vernetzt werden. Der WBGU sieht darüber hinaus einen wachsenden Bedarf zur rechtzeitigen Erkennung von Risiken für die Ernährungssicherheit durch Nutzungskonkurrenzen mit dem Anbau von Energiepflanzen. Besonders um die Risiken, die sich aus dem wachsenden Druck auf die globale Landnutzung ergeben, rechtzeitig zu erkennen und einhegen zu können, sind globale Monitoring- und Frühwarnsysteme sehr bedeutsam. Deswegen empfiehlt der WBGU die Einsetzung einer World Commission on Land Use (Kap. 10.3). Insbesondere fehlt ein globaler Landkataster, der Auskunft über den Zustand und Dynamik von Böden, Wasserressourcen und Landbedeckung (v.a Entwaldung) gibt. Die rasante Änderung der globalen Landnutzung ist aus Sicht des WBGU ein bisher unterschätztes Thema für Forschung und Politik.

4) Die Herausforderungen zur Sicherung der Welternährung müssen heute vor dem Hintergrund des zunehmenden Drucks auf die globale Flächennutzung bewältigt werden und können nicht mehr allein Gegenstand nationaler Bemühungen sein. Angesichts wachsender Ressourcenknappheit und der immer enger werdenden Verknüpfung zwischen nationalen und globalen Märkten einerseits und Nahrungsmittel- und Energiemärkten andererseits, müssen Wege hin zu einem globalen Landnutzungsmanagement konzipiert und beschritten werden, um eine weltweit ausreichende Nahrungsmittelproduktion sicherzustellen. Ein globales Abkommen zur Sicherung einer Mindestfläche, die für die Nahrungsmittelproduktion zur Verfügung steht, bildet ein mögliches Element eines globalen Landnutzungsmanagements.

10.5 Internationale Biodiversitätspolitik und nachhaltige Bioenergie

Für die Nutzung von Bioenergie sind die Ziele der Biodiversitätskonvention (Convention on Biological Diversity, CBD) direkt relevant, vor allem die Ziele der Erhaltung biologischer Vielfalt und deren nachhaltige Nutzung. Mit dem Ziel der Erhaltung biologischer Vielfalt ist die CBD das wichtigste internationale Abkommen, um die WBGU-Leitplanke für den Biosphärenschutz einzuhalten, mit der die Ausweitung der Landnutzung in ökologisch wertvolle Gebiete verhindert werden soll (Kap. 3.2). Auch die Zielsetzung einer nachhaltigen Nutzung biologischer Vielfalt kann durch geeignete Regelungen dazu beitragen, mögliche negative Auswirkungen von Bioenergie auf biologische Vielfalt zu vermeiden (Kap. 5.4). Daher konzentriert sich der WBGU im Folgenden auf die Aufgaben und Möglichkeiten der CBD.

Für die CBD ist das Thema Bioenergie erst 2007 bei einer Sitzung des wissenschaftlichen Ausschusses auf die Tagesordnung gekommen, und es wurde zu einem der wichtigsten Themen der 9. Vertragsstaatenkonferenz (COP-9) in Bonn. Ein dynamischer Ausbau der Bioenergie verstärkt den Druck auf die Landnutzung und damit auch auf die biologische Vielfalt. Daher müssen die laufenden Bemühungen um die Erhaltung und nachhaltige Nutzung biologischer Vielfalt intensiviert werden. Außerdem kann die CBD auch einen Beitrag zur Regulierung der nachhaltigen Nutzung der Bioenergie leisten. Mit Blick auf Bioenergie ergeben sich für den Biosphärenschutz und die CBD konkret die folgenden Herausforderungen:

Erstens können die Ausweitung und das effektive Management des globalen Schutzgebietssystems dazu beitragen, die durch Bioenergienutzung direkt oder indirekt ausgelöste Konversion natürlicher Ökosysteme einzuschränken (Kap. 5.4). Die Konvention hat hierzu einen Fundus an Erfahrungen, Instrumenten und Zielsetzungen zu bieten, gebündelt im Arbeitsprogramm zu Schutzgebieten (Kap. 10.5.1.1). Besondere Herausforderungen stellen sich im Zusammenhang mit der Finanzierung des Schutzgebietssystems (Kap. 10.5.2).

Zweitens gilt es, beim Anbau von Energiepflanzen oder bei der Nutzung von Wäldern zur Bioenergiegewinnung die Erhaltung und nachhaltige Nutzung biologischer Vielfalt zu gewährleisten. Die CBD kann hierzu – frühestens nach der nächsten Vertragsstaatenkonferenz 2010 – einen Beitrag leisten, indem sie Biodiversitätsleitlinien für eine nachhaltige Produktion und Nutzung von Bioenergie erarbeitet, die für entsprechende Standards genutzt werden können. Die von der Konvention erarbeiteten Prinzipien und

Arbeitsprogramme bieten hierfür eine gute Basis (Kap. 10.5.1).

Die folgenden Abschnitte gehen teils über den speziellen Fokus Bioenergie hinaus, da die Sicherung der Nachhaltigkeit der Landnutzung für Bioenergie nicht scharf von Landnutzung generell getrennt werden kann.

10.5.1 Schutzgebiete und Schutzgebietssysteme

Im Kapitel 5.4 wird deutlich, dass es durch den Ausbau der Bioenergienutzung zur Konkurrenz mit dem Naturschutz kommen kann. Ein unverzichtbares Instrument um derartige Konflikte zu vermeiden, ist ein effektives Schutzgebietssystem. Dabei reicht die Bedeutung von Schutzgebieten weit über Fragen der Bioenergie hinaus. Schutzgebiete gelten als unverzichtbares Instrument, um biologische Vielfalt zu erhalten (MA, 2005b, c; CBD, 2004b). Die CBD und der Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung haben sich zum Ziel gesetzt, dass die Verlustrate biologischer Vielfalt bis 2010 signifikant verringert wird. Diesem Ziel dient die vom WBGU vorgeschlagene Biosphärenleitplanke (Kap. 3.2): „10–20 % der weltweiten Fläche terrestrischer Ökosysteme (bzw. 20–30 % der Fläche mariner Ökosysteme) sollten für ein globales, ökologisch repräsentatives und effektiv betriebenes Schutzgebietssystem ausgewiesen werden. Zudem sollten auch etwa 10–20 % der Flussökosysteme inklusive ihrer Einzugsgebiete dem Naturschutz vorbehalten sein“.

Innerhalb des Schutzgebietssystems müssen sich der Schutz und die Nutzung biologischer Vielfalt, einschließlich der Bioenergienutzung, keineswegs immer ausschließen (WBGU, 2000). Der Weltnaturschutzverband IUCN unterteilt die Schutzgebiete nach Kategorien, je nach Schutzziel und Nutzungsintensität (Kategorien I–VI; IUCN, 1994; Kap. 5.4.1). Dabei sollten nur die Gebiete der Kategorien I–IV mit vorrangigem Schutzziel für die Einhaltung von Flächenzielen angerechnet werden (Pistorius et al., 2008), da die Kategorien V und VI den Schwerpunkt auf nachhaltiger Nutzung und nicht auf Erhaltung setzen. Bei den UNESCO-Biosphärenreservaten wird dieses Prinzip abgestufter Nutzungsintensitäten in ein Zonierungskonzept umgesetzt, bei dem Kernzonen von Puffer- und Entwicklungszonen umgeben sind (UNESCO-MAB, 1995).

Die CBD verpflichtet alle Vertragsstaaten, ein Schutzgebietssystem einzurichten (Art. 8(a)). Damit sind sie eine besondere Form der Flächennutzungsvereinbarung eingegangen: Zum Erhalt des globalen Guts biologische Vielfalt muss in bestimmten Gebieten auf degradierende Nutzung verzichtet werden. Darüber hinaus fordert die CBD, dass die Nutzung biologischer Ressourcen auch außerhalb von Schutzgebieten geregelt und verwaltet wird (Art 8(c) CBD; Glowka, 1994). Demnach kann der Naturschutz nicht allein auf die Schutzgebiete „delegiert“ werden, sondern alle Arten der Landnutzung müssen Aspekte der Erhaltung und nachhaltigen Nutzung biologischer Vielfalt integrieren.

Das derzeitige Schutzgebietssystem ist von der ausgewiesenen Fläche her beeindruckend: ca. 12 % der globalen Landfläche stehen bereits unter Schutz. Dennoch kann das Ziel längst nicht als erreicht gelten, da viele der Gebiete ihren Schutzzweck nur unzureichend erfüllen und gleichsam nur auf dem Papier existieren. Kasten 5.4-1 gibt einen Überblick über den Status quo der Schutzgebiete und Trends.

10.5.1.1 CBD-Arbeitsprogramm zu Schutzgebieten

Erst 12 Jahre nach der Unterzeichnung der Konvention wurde die Umsetzung des Artikels 8 mit einem gesonderten Arbeitsprogramm zu Schutzgebieten angegangen (CBD, 2004b), das seither den Rahmen für die Umsetzung durch die Vertragsstaaten bildet. Das Ziel ist, bis 2010 auf dem Land und bis 2012 im marinen Bereich ein ökologisch repräsentatives und gut geführtes globales Netzwerk aus nationalen Schutzgebietssystemen einzurichten. Das Arbeitsprogramm liest sich wie ein ambitionierter Aktionsplan des Naturschutzes, da es mit ergebnisorientierten Zielen konkret beschreibt, welche Maßnahmen bis zu welchem Zeitpunkt von den Staaten umgesetzt werden sollen. Eine konkrete, quantitative Verpflichtung zum Flächenschutz oder das Befolgen globaler Prioritätensetzungen etwa zur Sicherstellung einer globalen Repräsentativität waren jedoch bei der Verhandlung des Arbeitsprogramms nicht durchsetzbar. Es gibt aber einen Bezug zur globalen Strategie zum Schutz der Pflanzen, die ebenfalls unter dem Dach der CBD entwickelt wurde und u. a. vorgibt, dass bis 2010 10 % aller ökologischen Regionen der Welt geschützt sein sollen (Kap. 3.2).

Die nationale Umsetzung erfolgt allerdings im Kontext der Prioritäten der Vertragsstaaten. Die Staaten haben sich verpflichtetet, bis 2010 zu jeder COP über die Fortschritte der Umsetzung zu berichten. Nur wenige Länder kommen dem nach: lediglich 34 von 190 Vertragsstaaten haben über ihre Fortschritte berichtet (CBD, 2007). Viele Länder haben bereits Flächenschutzziele oder wollen sie festlegen: die Werte liegen im Bereich von 5–30 %. China z. B. hat sich vorgenommen, bis 2010 17 % der Landesfläche unter Schutz zu stellen. Bei der schwierigen Aufgabe, die Schutzgebiete zu vernetzen und mit der

übrigen Landnutzung zu integrieren, sind die bisherigen Erfolge sehr begrenzt. Ebenso fehlt in nahezu allen berichtenden Entwicklungsländern die Kapazität, um effektive Managementpläne für die bestehenden Schutzgebiete zu erarbeiten bzw. umzusetzen. Es ist zu vermuten, dass die Umsetzung in den 156 Staaten, die keinen Bericht abgegeben haben, noch schleppender vorankommt. Schnelle Fortschritte sind ohne erheblich vergrößertes Engagement in politischer wie finanzieller Hinsicht kaum zu erwarten.

10.5.1.2 Weitere Regelungen der CBD

In anderen Sektoren der CBD konnten konkrete Flächenschutzziele vereinbart werden. In der globalen Strategie zur Erhaltung der Pflanzen hat sich die CBD zum Ziel gesetzt, bis 2010 mindestens 10 % aller Ökoregionen der Welt, 50 % der wichtigsten Zentren für Pflanzenvielfalt und 60 % der gefährdeten Pflanzenarten effektiv zu schützen (CBD, 2002a; Kap. 3.2). Im Rahmen der Evaluation des strategischen Plans der Konvention (CBD, 2004c) wurde ebenfalls die konkrete Flächenangabe vereinbart, bis 2010 mindestens 10 % aller Ökoregionen (Kap. 14) der Welt effektiv zu schützen. Außerdem soll die Verlust- und Degradationsrate natürlicher Lebensräume vermindert werden. Im vorläufigen Zielrahmen der Konvention wird das 10 %-Ziel ebenfalls aufgegriffen und auf die verschiedenen thematischen Arbeitsprogramme übertragen: Meeres- und Küstenökosysteme, Binnengewässer, Wäldertypen, Bergökosysteme, Trockengebiete und Inselökosysteme sollen jeweils zu mindestens 10 %, und Gebiete, die besonders wichtig für die biologische Vielfalt sind, generell geschützt werden (CBD, 2006b).

10.5.1.3 Optionen für die Weiterentwicklung

Weiterentwicklungen der Schutzgebietspolitik müssen also verstärkt Voraussetzungen schaffen, um für ein repräsentatives globales Schutzgebietsnetzwerk zu sorgen, dessen wirksames Management ausreichend finanziert wird. Zusätzliche Vereinbarungen über Flächenschutzziele, ihre nationale Implementierung und internationale Finanzierungsleistungen bieten sich als Lösungen an.

Die LifeWeb-Initiative

LifeWeb ist eine von Deutschland angeregte globale Initiative zu Schutzgebieten (BMU, 2008e). Sie baut auf dem Arbeitsprogramm zu Schutzgebieten auf und soll zur Finanzierung der Umsetzung beitragen. Dazu sollen interessierte Entwicklungsländer erstens Schutzgebiete melden, deren Managementkapazitäten unterfinanziert sind, sowie zweitens „Kandidaten“ für mögliche neue Schutzgebiete angeben, wofür sie aber nicht die notwendigen Mittel aufbringen können. Diese Kandidaten werden in der UN-Schutzgebietsliste des UNEP-WCMC aufgeführt (WDPA, 2008). Länder, Organisationen oder Private, die zu einer verbesserten Finanzierung beitragen möchten, können dann auf bilateraler Basis mit Ländern kooperieren, die Kandidaten ausgeschrieben haben. Diese Initiative, die ausschließlich auf freiwillige Beteiligung ausgelegt ist und keine zusätzlichen Verwaltungsstrukturen schafft, wurde auf der COP-9 in Bonn diskutiert. Dort gab es von Seiten vieler Entwicklungsländer konkrete Angebote für Schutzgebietskandidaten, die sich auf eine Fläche von ca. 460.000 km^2 summieren. Die Bundesregierung gab die Zusage, bis 2012 zusätzliche 500 Mio. € (und danach jedes Jahr dieselbe Summe) in die LifeWeb-Initiative einzubringen. Leider haben auf der Konferenz weder EU-Partner noch G8-Länder weitere finanzielle Angebote vorgelegt. Deutschland wird also bei seinen Partnern unter den Industrieländern verstärkt für LifeWeb werben müssen, um die Initiative zu einem Erfolg zu führen.

Weiterentwicklung der CBD-Regelungen in Richtung eines Schutzgebietsprotokolls

Auf der COP-10 wird das 2010-Ziel evaluiert. Aller Voraussicht nach wird es mit Ausnahme weniger Teilerfolge verfehlt werden. Außerdem steht eine grundlegende Evaluierung des Arbeitsprogramms zu Schutzgebieten an. Auch hier lassen die Zwischenergebnisse vermuten, dass die ambitionierten Ziele des Programms von den meisten Vertragsstaaten verfehlt werden. Der Sukhdev-Report zur Ökonomie von Ökosystemen und biologischer Vielfalt (Zwischenergebnisse: Sukhdev, 2008) soll 2010 in seiner Endfassung vorliegen und den ökonomischen Wert der Erhaltung biologischer Vielfalt konkretisieren, ähnlich wie es der Stern-Review für den Klimaschutz erreicht hat (Stern, 2006). Ein Teil dieses Werts wird sich in den REDD-Regelungen der Klimarahmenkonvention widerspiegeln, in denen voraussichtlich Anreize für die Erhaltung von Wäldern als Klimaschutzmaßnahmen geschaffen werden (Kap. 11.2). Wenn zudem in 2010 die Verhandlungen zu einem internationalen Regime über den Zugang zu genetischen Ressourcen und gerechten Vorteilsausgleich zur Zufriedenheit der Entwicklungsländer abgeschlossen werden können, so ergibt sich eine Konstellation von Faktoren, die einen veränderten politischen Rahmen schafft. Dies könnte eine Weiterentwicklung der bestehenden CBD-Regelungen

in Richtung eines verbindlichen Schutzgebietsprotokolls ermöglichen (WBGU, 2006). Ein solches Protokoll sollte die ganze Bandbreite von Land-, Süßwasser- und Meeresschutzgebieten umfassen und das Spektrum von strengem Schutz bis zur Verknüpfung mit nachhaltiger Nutzung abdecken. Die Vertragsparteien eines solchen Protokolls würden sich zum Aufbau eines Schutzgebietssystems gemäß quantitativer Vorgaben verpflichten. Zu den konkreten Berichtspflichten sollte die Meldung der bestehenden Schutzgebiete (geografische Daten, geschützten Ökosystemtypen und Arten, Schutzgebietskategorie, Angaben zu Management, Finanzierung, Fortschritte und Hindernisse usw.) und noch auszuweisender „Kandidaten" an die globale Datenbank des UNEP-WCMC gehören. Auf dieser Datenbasis könnte ein wissenschaftlicher Beirat – etwa ein in der internationalen Diskussion befindliches IPCC-ähnliches Gremium zur Politikberatung im Bereich Biodiversität (Intergovernmental Panel on Biodiversity, IPBD: WBGU, 2000) – in regelmäßigen Abständen Statusberichte zum Schutzgebietsystem erarbeiten, die auch auf Repräsentativität, Effektivität sowie die Finanzierungs- und Umsetzungshindernisse eingehen. Damit verbundene Eingriffe in die staatliche Souveränität sollten möglichst gering gehalten werden. Ein Erfolg wird nur zu erreichen sein, wenn sich die Industrieländer im Gegenzug dazu verpflichten, ausreichende Finanzierungsmittel sowie Hilfen bei der Umsetzung bereitzustellen (Kap. 10.5.2).

10.5.2 Schwerpunkt: Finanzierung von Schutzgebietssystemen durch Kompensationszahlungen

Besonders biodiversitätsreiche Gebiete befinden sich vor allem auf dem Hoheitsgebiet von Entwicklungs- und Schwellenländern. Ohne zusätzliche Anreize werden diese Länder nicht bereit sein, Schutzverpflichtungen in einem Ausmaß einzugehen, das zum Erhalt globaler Biodiversität ausreicht. Durch derartige Verpflichtungen sehen sie ihre Souveränität und wirtschaftlichen Entwicklungschancen eingeschränkt. Zudem würden sie dann einen erheblichen Anteil der Kosten des Erhalts biologischer Vielfalt tragen, von dessen Nutzen die gesamte Staatengemeinschaft profitiert. Zusätzliche finanzielle Anreize z.B. durch Kompensationszahlungen sind daher notwendig. Sie würden vor allem Einkommensausfälle ausgleichen, die infolge des Verzichts auf ertragreichere, aber nicht nachhaltige Landnutzungen entstehen (Endres, 1995; WBGU, 2001a; 2002). So gesehen zielen Kompensationszahlungen auf den Erhalt wertvoller Leistungen aus Ökosystemen ab, die durch verschärfte Landnutzungskonkurrenzen etwa infolge des Anbaus von Energiepflanzen bedroht sind (Kap 5.4).

Der Finanzierungsbedarf für Kompensationen wird in erster Linie von den Nutzungsalternativen bestimmt. Die Opportunitätskosten des Schutzes in z.B. Naturparks und Landschaftsschutzgebieten sind dabei oft höher als in unbewohnten, abgelegenen Reservaten, in denen rentable Alternativnutzungen, wie z.B. der Anbau von Energiepflanzen, bisher kaum möglich sind (James et al., 1999). Pearce (2007) berechnet auf Basis von James et al. (1999) Opportunitätskosten der Erhaltung in Entwicklungsländern von unter 9 US-$ pro ha und Jahr. Das wäre deutlich weniger als die in einer internen Weltbank-Studie genannten Kosten von über 93 US-$ (zitiert in Pearce, 2007). Chomitz et al. (2004) gehen davon aus, dass die Opportunitätskosten vom landwirtschaftlichen Potenzial der Fläche bestimmt werden; in Entwicklungsländern lägen diese Kosten bei Hunderten US-$ pro ha, wenn die Alternative extensive Weidewirtschaft wäre, und Tausenden US-$ pro ha, wenn alternativ der Anbau hochwertiger, mehrjähriger Pflanzen möglich wäre. Systeme zur Regelung von Kompensationszahlungen existieren auf nationaler Ebene (FAO, 2007b; Wunder, 2005). Ein Beispiel ist das 1997 etablierte Programm Pagos por Servicios Ambientales (PSA) in Costa Rica (Kasten 10.5-1).

Unternehmen leisten Kompensationen im Zusammenhang mit nationalen Auflagen zur Schaffung von Ausgleichsflächen. In mehreren Staaten (u.a. Australien, USA, Kanada sowie Brasilien) sind Unternehmen, die eine intensive Landentwicklung beabsichtigen, dazu verpflichtet, andernorts für Ausgleichsflächen zu sorgen, indem sie z.B. Landbesitzer für den Verzicht auf alternative, profitablere Landnutzungen in biodiversitätsreichen Ökosystemen kompensieren. Nach derzeitigen nationalen Regelungen können die Verpflichtungen nur durch Ausgleichsflächen im Inland erfüllt werden (ten Kate et al., 2004; Carroll et al. 2007;). Es gibt daneben Unternehmensinitiativen, die mit freiwilligen Zahlungen für Ausgleichsflächen im In- und Ausland werben (ten Kate et al., 2004; Bishop, 2007). Kompensationszahlungen und die Einrichtung von Ausgleichsflächen sind aus Sicht der Unternehmen mit signifikanten Transaktionskosten verbunden. Mit den marktbasierten Institutionen eines Habitat Banking lassen sich diese Kosten reduzieren. Akteure sind hierbei Unternehmen, die zertifizierte Ausgleichsflächen schaffen und die Zertifikate anschließend an solche Unternehmen verkaufen, die naturnahe Landflächen erschließen wollen. Dieser Ansatz wurde zuerst in den USA in den 1990er bei Feuchtgebieten als Wetland Banking etabliert (Sulzman und Ruhl, 2002) und wird mittlerweile von der EU-Kommission zur Umsetzung emp-

Kasten 10.5-1

Zahlungen für Ökosystemleistungen in Costa Rica

In dem 1997 etablierten Programm Pagos por Servicios Ambientales (PSA) in Costa Rica, erhalten Landbesitzer Vergütungen für die Bereitstellung von Ökosystemleistungen aus Wäldern. Dabei leisten neben dem Staat auch private Nutznießer der Ökosystemleistungen, z.B. Wasserkraftwerke, freiwillige Zahlungen. Potenzielle Teilnehmer des Systems müssen zunächst einen Bewirtschaftungsplan vorlegen, der u. a. die Eigenschaften des betreffenden Waldstücks, die geplante Bewirtschaftungsmethode sowie die geplanten Maßnahmen z.B. zur Verhinderung von Degradation durch Waldbrände oder illegalem Holzeinschlag enthält. Die Waldbesitzer erhalten zunächst über fünf Jahre regelmäßige Zahlungen aus dem speziell dafür eingerichteten Fonds FONAFIFO (Fondo Nacional de Financiamiento Forestal; Pagiola, 2002). Im Anfangsjahr 1997 wurden ca. 14 Mio. US-$ für den Schutz von 79.000 ha bezahlt (Pearce, 2004). In Costa Rica, wie auch in Mexiko und in anderen Ländern, beteiligen sich internationale Geber an der Finanzierung, etwa die Weltbank und die Globale Umweltfazilität (GEF). In Costa Rica gab die Weltbank z.B. einen Kredit von 32,6 Mio. US-$ und die GEF einen Zuschuss von 8 Mio. US-$ (World Bank, 2002, 2007).

fohlen (EU-Kommission, 2007a, b). Auch in Malaysia sind hierzu erste Ansätze enetwickelt worden (Hawn, 2008). Nach Angaben von Carroll et al. (2007) tätigen allein die 400 Wetland Banks in den USA Transaktionen in Höhe von mehr als 1 Mrd. US-$ im Jahr. Im privaten Sektor leisten darüber hinaus zivilgesellschaftliche Organisationen (NROs, Stiftungen usw.) finanzielle Beiträge für Schutzgebiete und den Schutz biologischer Vielfalt allgemein. Nach vorsichtigen Schätzungen werden Zahlungen von bis zu 1 Mrd. US-$ pro Jahr für den internationalen Biodiversitätsschutz geleistet (OECD, 2003; Gutman und Davidson, 2007). Hinzu kommen Marktzahlungen für bestimmte privatisierbare Ökosystemleistungen wie Kohlenstoffzertifikate (Kasten 10.2-3), Bioprospektierung oder Ökotourismus (WBGU, 2000; 2004a). Dieses Segment hat derzeit eine Umfang von 1–2 Mrd. US-$ und wird für sich gesehen als sehr dynamisch eingeschätzt (Gutman und Davidson, 2007). Es bleibt abzuwarten, ob derartige Marktzahlungen künftig weiter zunehmen und, vor allem, ob sie als Kompensationen im internationalen Kontext eingesetzt werden.

Internationale Kompensationszahlungen sind gerechtfertigt, weil lokal und national bereitgestellte biologische Vielfalt oftmals grenzüberschreitenden Nutzen stiftet (WBGU, 2000; MA, 2005a; Perrings und Gadgil, 2005). Die Verfügungsrechte der hierfür relevanten Ressourcen sind einzelnen Nationalstaaten zugewiesen, die so über das Angebot biologischer Vielfalt und daraus resultierender Ökosystemleistungen entscheiden. Drohen diese global wertvollen Leistungen zurückzugehen, können andere Länder konditionale Zahlungen anbieten, die die Nutzen-Kosten-Relationen alternativer Landnutzungen im Ressourcenland zugunsten nachhaltiger Nutzungen verändern. Diese Zusammenhänge gelten vor allem in tropischen Schwellen- und Entwicklungsländern mit ihren global bedeutenden Ausstattungen an biologischer Vielfalt. Viele dieser Länder erwägen, die Bioenergieproduktion erheblich auszubauen oder haben hierzu bereits Maßnahmen ergriffen (Kap. 4.1). Damit steigt direkt oder indirekt die Gefahr degradierender Nutzungen von Landressourcen (Kap. 5.4), wodurch wiederum Implikationen für einen wirksamen Einsatz internationaler Zahlungen entstehen (Kap. 10.5.2.1).

10.5.2.1 Finanzierung des globalen Schutzgebietsnetzes durch internationale Zahlungen

Schätzungen für den Finanzierungsbedarf eines globalen Schutzgebietsnetzes einschließlich Meeresschutzgebiete variieren je nach Abgrenzungen und Annahmen über den Schutzgrad (Gutman und Davidson, 2007; Schmitt et al., 2007). So unterstellen Balmford et al. (2002) Kosten pro Jahr von 45 Mrd. US-$$_{2000}$. James et al. (1999) gehen von 27,5 Mrd. US-$$_{1996}$ aus. Die gesamten Ausgaben für Schutzgebiete werden auf weltweit 6–10 Mrd. US-$ pro Jahr geschätzt, davon bringen Entwicklungsländer 1,3–2,5 Mrd. US-$ auf (James et al., 1999; Molnar et al. 2004; Gutman und Davidson, 2007;). Dabei kommen verschiedene Finanzierungsmechanismen zur Anwendung (Gutman und Davidson, 2007). Die Zahlungen schließen Ausgaben für das Schutzgebietsmanagement mit ein, nur ein geringer Teil stellt also Kompensationszahlungen dar. Die Höhe der derzeitigen internationalen Zahlungen für den gesamten Biodiversitätsschutz wird mit 4–5 Mrd. US-$ jährlich beziffert, davon 30–50 % für das Schutzgebietsnetz. Rund 2 Mrd. US-$ werden im Rahmen der bi- und multilateralen Entwicklungszusammenarbeit der OECD-Staaten bereitgestellt (OECD, 2002; Gutman und Davidson, 2007). Hierbei dominiert die bilaterale Entwicklungszusammenarbeit. Von Seiten Deutschlands ist vor allem das Tropenwaldschutzprogramm zu nennen, für das in 2007 Ausgaben in Höhe von über 100 Mio. € veranschlagt wurden (BMZ, 2008a, b). Hinzu kommen Debt-for-Nature Swaps, bei denen

Kasten 10.5-2

Etablierung eines internationalen Markts für zertifizierte Schutzleistungen

Einen internationalen Markt für zertifizierte Schutzleistungen zur Finanzierung eines globalen Schutzgebietsnetzes zu etablieren, stellt eine konzeptionelle Weiterentwicklung der LifeWeb-Initiative der Bundesregierung dar (Kap. 10.5.1.3). Der folgende Vorschlag dazu basiert z.T. auf dem Konzept handelbarer Verpflichtungsscheine (WBGU, 2002). Kerngedanke ist es, die Finanzierung von Schutzgebieten außer durch Eigenleistungen der Standortländer systematisch durch internationale Kompensationszahlungen zu finanzieren. Um Kompensationszahlungen zu fördern und effizient zu gestalten, bietet es sich an, das Gut „geschützte Fläche" zu standardisieren und hierfür einen globalen Markt zu etablieren: Vorgaben sollten regeln, welche Voraussetzungen Flächeneinheiten in ihrer Beschaffenheit erfüllen müssen, damit sie eine Zertifizierung erhalten und als Kandidat auf dem Markt angeboten werden dürfen. Nach Möglichkeit sollte ein weltweit anerkanntes Zertifikat für einen qualitativ hochwertigen Biodiversitätsschutz angestrebt werden, analog etwa zum Gold Standard beim CDM.

Angebot und Nachfrage

Grundsätzlich können Staaten oder alle anderen Akteure auf dem Markt zertifizierte Schutzleistungen nachfragen oder anbieten, wobei das größte Angebot durch die biodiversitätsreichen Entwicklungs- und Schwellenländer zu erwarten ist. Angebotsaktivitäten sollten freiwillig sein; der Anreiz zum Angebot sollte sich aus den Einnahmemöglichkeiten am Markt ergeben. Um eine Mindestnachfrage nach zertifizierten Schutzleistungen zu generieren, sollten die Vertragsstaaten Verpflichtungen zum Erwerb von Schutzzertifikaten eingehen. Die Höhe der Verpflichtungen sollte grundsätzlich vom Prinzip der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit abhängen – Industrieländer tragen somit zur Finanzierung globaler Biodiversität deutlich mehr bei als Entwicklungsländer. Zum anderen sollte der Verteilungsschlüssel auch die Prinzipien der Subsidiarität und ökologischen Leistungsfähigkeit berücksichtigen – je mehr Biodiversität ein Staat auf eigenem Territorium grundsätzlich schützen kann, umso höher ist seine Verpflichtung im Vergleich zu anderen Ländern auf vergleichbarem wirtschaftlichem Entwicklungsstand. Von derartigen Bestimmungen wäre die existierende Verpflichtung in der CBD unberührt, wonach jeder Vertragsstaat ein eigenes Schutzgebietssystem im Inland aufbauen und pflegen muss (Art. 8 CBD). Es muss sichergestellt sein, dass biodiversitätsreiche Staaten nicht nur Schutzleistungen auf dem internationalen Markt anbieten, sondern stets auch selbst Verpflichtungen eingehen. Zur Erfüllung dieser Verpflichtung können Zertifikate für Schutzleistungen im eigenen Land verwendet werden. Für die konkrete Ausgestaltung der Verpflichtungen käme eine bestimmte Menge an Schutzzertifikaten in Frage, die immer dann erworben werden muss, wenn das Angebot hinreichend ist. Da zumindest in der Anfangsphase schwer absehbar ist, welche Zertifikatspreise sich einpendeln werden, bietet sich ergänzend zur Höhe der Zertifikatsmenge der eine Ausgabengrenze an, bei deren Überschreiten ein Staat keine weiteren zertifizierten Schutzverpflichtungen erwerben muss. So könnte eine fiskalische Überforderung der Nachfragerstaaten vermieden werden. Allerdings ist dabei zu beachten, dass eine solche Deckelung die ökologische Effektivität beeinträchtigt und einige Staaten dazu verleiten könnte, z.B. aus außenpolitischen Erwägungen heraus, Schutzleistungen zu bewusst überhöhten Preisen von bestimmten Ländern zu erwerben.

Funktionsweise des Marktes

In diesem Marktsystem ist eine Steuerung wünschenswert, die eine Repräsentativität des globalen Schutzgebietsnetzes gewährleistet. Durch die Meldung der Kandidaten für Schutzgebiete seitens der Anbieter erfolgt durch die Zertifizierung eine ökologische Kategorisierung. Der Prozess der Zertifizierung könnte auf der LifeWeb-Initiative aufbauen: Anbieter melden Kandidaten, die zertifiziert werden. Die Flächengröße ist die quantitative Grundlage. Nachfragerstaaten müssen eine bestimmte Menge an zertifizierten Schutzleistungen erwerben und können sich die entsprechende Fläche auf ihre eingegangene Verpflichtung anrechnen lassen. Sie können sich aber selber aussuchen, welche Flächen sie einkaufen. Je nach ihren Präferenzen, z.B. dem favorisierten Ökosystemtyp (Regenwald, Hotspot oder Schutz von flagship species usw.) kaufen sie dann den Schutz konkreter Flächen nach dem Prinzip „first come, first serve". Unter der Annahme, dass die Nachfragerstaaten an ökologisch wertvollen Flächen besonders interessiert sind, etwa weil dies im Interesse der Bevölkerung liegt und diese entsprechend Druck auf die staatlichen Entscheidungsträger ausübt oder weil z.B. die Auswahl fachkundigen Vertretern überlassen wird, ergäbe sich somit ein Anreiz, die Mittel möglichst schnell zur Verfügung zu stellen, damit man sowohl kostengünstige als auch ökologisch attraktive Schutzleistungen erwirbt. Zugleich gäbe es einen Anreiz für Anbieterstaaten, nicht Gebiete mit niedrigen Opportunitätskosten, sondern auch biodiversitätspolitisch attraktive Gebiete als Kandidaten zu nominieren. Regelmäßige Bewertungen eines Intergovernmental Panel on Biodiversity (IPBD; WBGU, 2000, 2001a) können die Entwicklung des Schutzgebietssystems transparent machen und unterrepräsentierte Ökosysteme (derzeit z.B. Feuchtgebiete oder marine Ökosysteme) oder Artengruppen ausweisen, die dann im Markt mit einem Wertungsbonus versehen würden, um den Erwerb von Schutzzertifikaten aus diesen Segmenten zu fördern.

Solch ein Marktsystem für zertifizierte Schutzleistungen z.B. im Rahmens eines Schutzgebieteprotokoll kann angesichts der derzeitigen politischen Situation nur ein mittel- oder gar langfristiges Projekt sein, für das jedoch bereits jetzt die Weichen gestellt werden sollten. Für die LifeWeb-Initiative sollten möglichst viele Partnerstaaten, NROs und Unternehmen gewonnen und der Zertfizierungsprozess angestoßen werden. Die Frage einer möglichen oder sinnvollen Verknüpfung eines derartigen Protokolls an das derzeit entstehende REDD-Regime der UNFCCC (Kap. 10.2) sollte in Forschungsvorhaben ausgelotet werden (Kap. 11).

Auslandsschulden gegen Naturschutz getauscht werden (WBGU, 2000, 2002). Zwischen 1987 und 2003 wurden auf diesem Wege umgerechnet etwa 2,2 Mrd. US-$ in den Naturschutz investiert (Pearce, 2004). Solche Swaps werden nicht nur von öffentlichen, sondern auch von privater Seite finanziert und durchgeführt.

Große Erwartungen im Hinblick auf eine künftige Finanzierungswirkung für den globalen Biodiversitätsschutz werden an den globalen Kohlenstoff-

markt sowie im Besonderen an den REDD-Prozess im Rahmen der UNFCCC geknüpft (Kap. 10.2; Kasten 10.2-2; Gutman und Davidson, 2007; Huberman, 2007). Dabei müssen jedoch zunächst die möglichen unterschiedlichen Ausgestaltungen eines REDD-Regimes im Hinblick auf ihre Auswirkung auf die Funktionsfähigkeit des Kohlenstoffmarkts sowie auch ihr realisierbares Finanzierungspotenzial untersucht werden (Kasten 10.5-2; Kap. 11.5.4).

Über die Finanzierung von Schutzgebieten hinaus sind Kompensationszahlungen auch generell für den Schutz biologischer Vielfalt in der umliegenden Kulturlandschaft anwendbar. Schutzmaßnahmen in Kulturlandschaften sind nach sehr groben Schätzungen von James et al. (1999) mit jährlichen Kosten im niedrigen dreistelligen Milliardenbereich verbunden. Diese Kosten des Biodiversitätschutzes werden in der Regel dem Landbesitzer auferlegt bzw. zum Teil auf die Konsumenten von Agrargütern übertragen. Nach Gutman und Davidson (2007) kann zwar ein wesentlicher Teil dieser Kosten u.a. durch Effizienzgewinne als Ergebnis einer nachhaltigeren Landnutzung langfristig ausgeglichen werden, aber Kompensationszahlungen können einen wichtigen Beitrag leisten, um Finanzierungslücken zu schließen.

Zusammenfassend ist das derzeitige weltweite Zahlungsvolumen gegenüber dem geschätzten Finanzierungsbedarf für Schutzgebiete deutlich zu gering. Bislang existiert für diesen Zweck kein abgestimmtes, institutionalisiertes System von internationalen (Kompensations-)Zahlungen. Die Zahlungen werden vorrangig dezentral und als konditionale Projektfinanzierungen in der Entwicklungszusammenarbeit geleistet. Anders als in anderen Feldern der Entwicklungszusammenarbeit geht es beim Biodiversitätsschutz aber nicht um eine Anschubfinanzierung für z.B. industrielle Sektoren, sondern um den dauerhaften Erhalt natürlicher Ressourcen von globalem Wert. Von daher sollten Zahlungen – anders als in der herkömmlichen Projektfinanzierung – periodisch und langfristig verlässlich erfolgen (Swanson, 1999). Nur so können wirksam Anreize für einen dauerhaften Verzicht auf nicht nachhaltige Landnutzungen gesetzt werden. Aus diesem Grund sind zusätzliche Finanzierungsmechanismen erforderlich.

10.5.2.2 Optionen für die Weiterentwicklung – Anforderungen an ein internationales Kompensationsregime

Kompensationszahlungen können nur dann einen wirksamen Anreiz setzen, wenn ausreichend finanzielle Mittel für diesen Zweck bereitgestellt werden. Gemäß dem Prinzip der gemeinsamen aber unterschiedlichen Verantwortung ist es angezeigt, dass zunächst jedes Land entsprechend seiner ökonomischen Leistungsfähigkeit und seiner ökologischen Ausstattung mit Biodiversität eigene Anstrengungen leistet. Die Entscheidung über die hierfür geeigneten Instrumente, d.h. nationale Kompensationszahlungen oder andere Maßnahmen, liegt jeweils bei den souveränen Staaten. Im Rahmen der CBD gibt es seit längeren Bestrebungen, eine Strategie zur Mobilisierung zusätzlicher finanzieller Ressourcen zu entwickeln. Bislang hat dieser Prozess allerdings kaum zu Ergebnissen geführt. Konkret für die Umsetzung des Arbeitsprogramms zu Schutzgebieten haben die Industrieländer auf der COP-9 nur wenig Bereitschaft gezeigt, zusätzliche Mittel bereitzustellen. Eine Ausnahme bildet die deutsche Zusage von 500 Mio € für die LifeWeb-Initiative (Kap. 10.5.1.3).

Nach Ansicht des WBGU stehen die OECD-Länder, aber auch wirtschaftlich aufstrebende Länder wie Russland oder die ölreichen Staaten in der Verantwortung, bei der Finanzierung der Schutzgebiete weltweit erheblich mehr zu leisten als bisher. Auch wenn es strittig sein dürfte, wie hoch ein angemessener Eigenanteil der biodiversitätsreichen Entwicklungs- und Schwellenländer ist, so wird angesichts des enormen globalen externen Nutzens der biologischen Vielfalt doch deutlich, dass die durch die internationale Gebergemeinschaft mobilisierten Mittel bei weitem nicht adäquat sind. Die Hocheinkommensländer müssten je nach Höhe des als angemessen erachteten Anteils der wirtschaftlich ärmeren Ressourcenländer jährlich etwa 20–30 € pro Einwohner mobilisieren, um die Finanzierungslücke zu schließen. Der Nutzen des damit erreichbaren Naturschutzes dürfte diesen Betrag um ein Mehrfaches übersteigen (WBGU, 2004a).

Die eingesetzten finanziellen Mittel sollten effizient eingesetzt und Mitnahmeeffekte vermieden werden. Kompensationen sollten sich auf biologische Vielfalt fokussieren, deren Existenz durch sich verschärfende Landnutzungskonkurrenzen bedroht ist, wie es etwa infolge einer wachsenden Bioenergienutzung zu erwarten ist. Wenn mit zunehmender Bioenergienachfrage der Ertrag degradierender Flächennutzung steigt, dann müssen auch die Kompensationszahlungen in ihrem Umfang steigen, um (weiterhin) einen adäquaten Schutz zu ermöglichen. Nach einer Studie von IFPRI (2008) ist der zuletzt beobachtete durchschnittliche Anstieg der Getreidepreise zu 30 % auf die verstärkte Nachfrage nach Biokraftstoffen zurückzuführen. Schreitet der Ausbau der Biokraftstoffnutzung voran, dann könnten die Preise 2020 real um 18 % bzw. 26 % höher liegen als in einer Situation, wo die Biokraftstoffproduktion auf dem derzeitigen Niveau gehalten wird (Kap. 5.2.5.2). Kompensationszahlungen für einen

effektiven Schutz müssten damit allein in Folge eines Biokraftstoffbooms, d.h. der Effekt einer steigenden Nachfrage der stofflichen Nutzung (u.a. Holz) ist noch nicht berücksichtigt, je nach Fläche in einem entsprechend vergleichbaren Umfang ansteigen. Damit wird auch deutlich, wie eng die Bioenergiepolitik und der Biodiversitätsschutz auch in Finanzierungsfragen miteinander verwoben sind. Ökonomische Effizienz erfordert, dass die Schutzziele mit möglichst geringem Aufwand erreicht werden. Grundsätzlich können effiziente Zahlungen dort vermutet werden, wo Suchprozesse nach einem kostengünstigsten Schutz über Marktinstitutionen organisiert werden. Auf nationaler Ebene ist dies etwa durch das „habitat banking" bereits erfolgt. Auf einem internationalen Markt könnten Standortländer den Schutz von Flächen anbieten und Nachfragerländer für den Schutz der Flächen Zahlungen leisten. Grundsätzlich müssen für einen funktionsfähigen Markt für Schutzleistungen aber eine Reihe von bislang auf internationaler Ebene nicht gegebenen Anforderungen erfüllt sein (WBGU, 2002; Kulessa und Ringel, 2003; Eco-Trade, 2008). Dazu zählt die Definition der handelbaren Leistungen, die für den Bereich des Biodiversitätsschutzes in der Umsetzung sehr komplex sein kann, da nicht nur der Flächengröße, sondern auch der ökologischen Ausstattung auf der Fläche Rechnung getragen werden müsste. Eine Möglichkeit ist es, ökologische Kernkriterien für die Qualität der Flächen vorzugeben, und die weitere Auswahl den Nachfragern zu überlassen. Um Freifahrerverhalten in der Breite zu verhindern, welches letztlich dazu führen würde, dass sich kaum noch zahlungsbereite Akteure finden, sollten sich die Staaten einigen, den Biodiversitätsschutz durch Schutzgebiete gemeinsam zu finanzieren, indem sie sich z.B. verpflichten, ausreichend Kontingente an „Schutzzertifikaten" nachzufragen (Kasten 10.5-2).

10.5.3 Beiträge der CBD für die Entwicklung von Bioenergiestandards

Bei der Aufgabe der Erhaltung biologischer Vielfalt im Zusammenhang mit Bioenergienutzung geht es nicht nur um den Aufbau effektiver Schutzgebietssysteme, sondern auch sondern auch um die Erhaltung und nachhaltige Nutzung biologischer Vielfalt bei Bioenergieanbausystemen in der Kulturlandschaft (Kap. 5.4 und 7.1). Ein wichtiges Instrument hierfür sind Standards für die nachhaltige Bioenergieproduktion (Kap. 10.3).

Aufgrund ihres begrenzten Zielrahmens ist die CBD nicht das geeignete Forum, um umfassende Nachhaltigkeitsstandards zu Bioenergie zu entwickeln, da die CBD nicht die gesamte Bandbreite der notwendigen ökologischen und sozialen Dimensionen abdecken kann. Sie kann allerdings auf dem Gebiet ihrer Kompetenz, also zur Erhaltung und nachhaltigen Nutzung biologischer Vielfalt, Biodiversitätsleitlinien entwickeln und somit Bausteine für derartige Standards liefern.

10.5.3.1 Bestimmungen der CBD als Grundlagen für Bioenergiestandards

Eine inhaltliche Grundlage hierfür liefern die Bestimmungen der CBD. Beispielsweise verpflichten sich die Vertragsstaaten dazu, biologische Ressourcen innerhalb wie außerhalb von Schutzgebieten zu regeln und zu verwalten, um ihre Erhaltung und nachhaltige Nutzung zu gewährleisten (Art 8(c) CBD), Ökosysteme, Lebensräume und Arten in ihrer natürlichen Umgebung zu erhalten (Art 8(d) CBD), bei der Nutzung biologischer Ressourcen negative Auswirkungen auf die biologische Vielfalt zu vermeiden oder auf ein Mindestmaß zu beschränken (Art 10(b) CBD). Die Verpflichtung zum Aufbau von nationalen Schutzgebietssystemen wird in Kapitel 10.5.1 behandelt. Im vorläufigen Zielrahmen der Konvention (CBD, 2004c) wird generell gefordert, dass Produkte, die auf biologischer Vielfalt basieren, aus Quellen und Gebieten kommen sollen, die nachhaltig und in Einklang mit der Erhaltung biologischer Vielfalt bewirtschaftet werden. Folgende Themen in der CBD liefern wichtige Prinzipien, die für die Ausgestaltung genutzt werden sollten:

- *Ökosystemarer Ansatz:* Als Strategie für das integrierte Management von Land, Wasser und biologischen Ressourcen hat die CBD den ökosystemaren Ansatz entwickelt, welcher als übergreifender, handlungsleitender Rahmen die Erhaltung und nachhaltige Nutzung biologischer Vielfalt fördern soll (CBD, 2000). Der Ansatz besteht aus 12 Prinzipien, die sehr hoch aggregiert und allgemein formuliert sind und daher mit interpretierenden Leitlinien ergänzt wurden (CBD, 2004a). Der Beschluss der COP-9 bestätigt erneut den ökosystemaren Ansatz und fördert seine breite Anwendung durch verbesserte Kommunikation (CBD, 2008b).
- *Addis-Abeba-Prinzipien:* Die von der Konvention 2004 verabschiedeten 14 Prinzipien und Leitlinien zur nachhaltigen Nutzung biologischer Vielfalt (Addis-Abeba-Prinzipien; CBD, 2004d) bieten einen zusätzlichen Handlungsrahmen dafür, dass die Nutzung von Bestandteilen biologischer Vielfalt nicht langfristig zum Verlust biologischer Vielfalt beiträgt. Die COP-9 hat beschlossen, Prin-

Kasten 10.5-3

Klimaschutz und Biodiversitätsschutz im Rahmen der internationalen Klimapolitik

Ein funktionsfähiges REDD-Regime könnte Synergien im Klima- und Biodiversitätsschutz hervorrufen. So können Projekte und Handlungen im Landnutzungsbereich, deren Zweck der Klimaschutz ist, oftmals unmittelbar auch zum Erhalt der Biodiversität beitragen, etwa wenn naturnahe Ökosysteme mit hohem Kohlenstoffgehalt vor Umnutzung und Degradation geschützt werden. Allerdings kann eine unter Klimagesichtspunkten optimierte Landnutzung (Kap. 5.5) durchaus den Biodiversitätsschutz auch erschweren. Ein Beispiel hierfür ist Klimaschutz durch Aufforstung, die z.B. bei der Konversion natürlicher Flächen auch negative Wirkungen auf Biodiversität haben kann. Auch das Verhältnis zwischen Biodiversitätschutz und dem auch klimaschutzpolitisch motivierten Anbau von Energiepflanzen ist ambivalent: Die Probleme werden in Kapitel 5.4 diskutiert. Zielkonflikte sind z.B. bei Konversion von Grasland oder Savannen im Zuge des Energiepflanzenanbaus zu erwarten. Sie führt zwar nur zu einer moderaten Kohlenstofffreisetzung, die durch die anschließende Bioenergienutzung vergleichsweise schnell wieder kompensiert wird; die Konversion kann aber Biodiversitätsverluste nach sich ziehen.

Massnahmen zur Abstimmung des Klimaschutzes mit dem Biodiversitätschutz bei der Landnutzung

Die Marrakesh Accords zum Kioto-Protokoll halten explizit fest, dass die Aktivitäten im Landnutzungsbereich (LULUCF) zum Erhalt der Biodiversität und zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen beitragen sollen (UNFCCC, 2002). Die Möglichkeiten der UNFCCC, negative Effekte der Klimaschutzmaßnahmen auf den Biodiversitätsschutz auch wirklich zu vermeiden, unterscheiden sich zwischen projektbasierten Maßnahmen und nicht projektbasiertem Klimaschutz. Für projektbasierte Maßnahmen (z.B. CDM) bieten sich Nachhaltigkeitsstandards oder Umweltverträglichkeitsprüfungen an, die Biodiversitätsaspekte umfassen. Insbesondere indirekte Landnutzungsänderungen durch Verschiebungseffekte, die sich negativ auf die Biodiversität auswirken, sind jedoch schwer zu erfassen. Noch schwieriger ist es, die nicht projektbasierten Anreize zum Klimaschutz im Rahmen der UNFCCC durch nationale Emissionsobergrenzen der verpflichteten Länder so auszurichten, dass negative Effekte auf die biologische Vielfalt gering gehalten werden. Hier könnte sich der Spielraum vergrößern, wenn Verpflichtungen im LULUCF-Bereich nicht vollkommen flexibel mit den Verpflichtungen in den anderen Sektoren austauschbar sind: Dann ergäbe sich die Möglichkeit, im LULUCF-Sektor über die vermiedenen Treibhausgasemissionen hinaus noch weitere Kriterien zu berücksichtigen, ohne die Effektivität des Regimes in Bezug auf die Minderung der fossilen Emissionen zu gefährden.

Daher ist angesichts der dynamisch ablaufenden Verhandlungen der UNFCCC zum Thema verminderte Entwaldung in Entwicklungsländern (REDD) eine rechtzeitige Zuarbeit der CBD wichtiger denn je. Auf der COP-9 der CBD wurde dazu beschlossen, dass eine CBD-Expertengruppe fachliche Beiträge für die UNFCCC-Verhandlungen leisten soll, um Synergien zu sichern und Risiken zu vermeiden. Zusätzlich ist eine bessere Vernetzung der jeweiligen wissenschaftlichen Gremien beider Konventionen sinnvoll. Auf der operativen Durchführungsebene sollte eine engere Koordinierung innerhalb der nationalen Ministerien und Behörden angestrebt werden, die für die Verhandlung und Umsetzung von UNFCCC und CBD verantwortlich sind (Roe, 2006).

Insgesamt besteht internationaler Diskussions- und allgemeinen Forschungsbedarf, auf welche Weise Synergien zwischen Klima- und Biodiversitätsschutz institutionell besser verknüpft und Konflikte geregelt werden können (Kap. 11).

zipien in Zusammenarbeit mit der FAO weiterzuentwickeln.

- *Globale Strategie zum Schutz der Pflanzen:* Mit dieser Strategie hat sich die CBD konkretere Ziele gesetzt: Bis 2010 sind mindestens 30 % des genutzten Lands (vor allem land- und forstwirtschaftliche Flächen) so zu bewirtschaften, dass dies mit dem Schutz der Pflanzendiversität konsistent ist und negative Wirkungen auch in angrenzenden Ökosystemen vermieden werden (Target 6; CBD, 2002a). Zudem sollen bis 2010 30 % der auf Pflanzen basierten Produkte aus nachhaltig genutzten Ökosystemen stammen, wobei soziale und Umweltaspekte zu integrieren sind (Target 12). Die Verbreitung der Anwendung von Nachhaltigkeitsstandards und der Anteil an zertifizierten Produkten sind für dieses Ziel als möglicher Indikator vorgeschlagen.
- *Arbeitsprogramme zu Landwirtschaft und Wäldern:* In vielen Ländern findet sich der größte Anteil biologischer Vielfalt in der Kulturlandschaft außerhalb der Schutzgebiete. Zu effektiven, in die Landschaft integrierten Schutzgebietssystemen muss also die Integration des Schutzgedankens in die Fläche hinzukommen (Kap. 3.2). Die Forderung nach einer nachhaltigen Landnutzung auf allen land- oder forstwirtschaftlich genutzten Flächen muss daher auch den Schutz biologischer Vielfalt enthalten, da die für die Steigerung der Flächenproduktivität weiterhin notwendige Intensivierung ansonsten mit erheblichen Risiken für die biologische Vielfalt verbunden ist (MA, 2005b; Phillips und Stolton, 2008). Dies gilt auch für die Anbausysteme von Energiepflanzen (Kap. 7.1). Die Zusammenhänge zwischen Land- und Forstwirtschaft und biologischer Vielfalt sind in der Konvention Gegenstand von Arbeitsprogrammen, die den Vertragsstaaten Zielrichtungen und Instrumente an die Hand geben, um die Vereinbarkeit von Bewirtschaftung und den Zielen der CBD zu verbessern. Beide Programme geben keine konkreten Zielvorgaben. Im Beschluss zur Landwirtschaft der COP-9 finden sich zu Bioenergie lediglich allgemeine Hinweise zur Förderung der positiven und Minderung der negativen Wirkungen von Biotreibstoffen auf biologische Viel-

falt. Im Beschluss zu Wäldern gibt es keinen Hinweis auf Bioenergie.

- *Gentechnisch veränderte Organismen:* Art 8(g) verpflichtet die Vertragsstaaten der CBD, Mittel zur Regulierung, Bewältigung oder Kontrolle der Risiken einzuführen, die mit der Nutzung oder Freisetzung von GVOs zusammenhängen. Im Cartagena-Protokoll über biologische Sicherheit wird dies in Bezug auf den sicheren Transfer, Umgang und Nutzung mit Fokus auf grenzüberschreitende Bewegung von GVOs ausformuliert. Das Protokoll sieht vor, dass diesbezüglich nach dem Vorsorgeansatz vorgegangen wird. Bei mangelnder Datengrundlage hinsichtlich der möglichen nachteiligen Umweltauswirkungen von GVO kann demnach eine Zulassung verweigert werden, um diese nachteiligen Umweltauswirkungen zu vermeiden.

10.5.3.2 Wege zur Umsetzung biodiversitätsrelevanter Bioenergieleitlinien oder -standards

Diese CBD-Regelungen sind als inhaltliches Fundament für die Entwicklung von Biodiversitätsleitlinien oder Standards für Bioenergieproduktion wie auch generell für alle Arten der Landnutzung prinzipiell geeignet, müssen aber auf Basis des Vorsorgeansatzes konkretisiert und ausgestaltet werden (Kap. 10.3). Dabei geht es um die folgenden Dimensionen:

- *Schutz biologischer Vielfalt:* Bei der Produktion von Bioenergie bzw. Biomasse soll der Schutz biologischer Vielfalt gewährleistet sein. Insbesondere sollen Schutzgebiete und Elemente für Schutzgebietssysteme sowie Ökosystemen mit hohem Wert für biologische Vielfalt von der (direkten wie indirekten) Umwandlung zugunsten von Bioenergie ausgeschlossen sein (Kap. 5.4.2 und 10.5.1). Hierfür ist die Umsetzung und Weiterentwicklung des Arbeitsprogramms für Schutzgebiete zum Auf- und Ausbau effektiver nationaler Schutzgebietssysteme erforderlich (Kap. 10.5.1.1). Als eine Voraussetzung für das notwendige Monitoring ist der Ausbau der Weltdatenbank zu Schutzgebieten zu empfehlen (WDPA, 2008). Es geht darüber hinaus aber auch um den kleinskaligen Schutz von Flächen mit hohem Wert für biologische Vielfalt in der Kulturlandschaft (Kap. 5.4.2). Diese Gebiete sollten identifiziert, mit Pufferzonen umgeben und, wo sinnvoll, mit Blick auf einen Biotopverbund mit Korridoren vernetzt sein. Vor der Konversion von ungenutztem Land (z.B. marginales, degradiertes oder brachliegendes Land) für Bioenergie muss der ökologische Wert untersucht werden.
- *Nachhaltige Nutzung biologischer Vielfalt* bei der Produktion von Bioenergie, sei es durch Energiepflanzen oder durch die Nutzung von Reststoffen. In den Agrar- und Forstökosystemen soll die Begleitflora und -fauna sowie die genetische Vielfalt gesichert sein und es sollen negativer Wirkungen auf andere Ökosysteme vermieden werden. Dies erfordert auf das Anbausystem und die lokalen Bedingungen abgestimmte Regelungen, u.a. mit Blick auf Einhaltung von Fruchtfolgen, Nutzung von Wasser und Agrarchemikalien sowie die Vermeidung des Anbaus potenziell invasiver Arten (Kasten 5.4-2). Bei der Nutzung gentechnisch veränderter Organismen bieten Art. 8(g) der CBD und die Bestimmungen des Cartagena-Protokolls über biologische Sicherheit einen zu konkretisierenden Handlungsrahmen, um z.B. eine Ausbreitung der veränderten Gene in Wildpopulationen zu verhindern.

Ob die CBD einen solchen inhaltlichen Beitrag leisten soll, wird sehr kontrovers diskutiert. Die EU möchte gerne die CBD zur Entwicklung von Leitlinien nutzen, die helfen sollen, mögliche negative Wirkungen von Biokraftstoffen auf biologische Vielfalt zu minimieren. Brasilien, unterstützt von Argentinien und z.T. anderen Ländern nimmt eine sehr optimistische Gegenposition hinsichtlich des Potenzials und der Umweltfreundlichkeit von Biokraftstoffen ein. Demnach sei es nicht sinnvoll, das Thema Biokraftstoffe und insbesondere Nachhaltigkeitsstandards in der CBD zu behandeln. Viele Nichtregierungsorganisationen hingegen warnen im Rahmen der CBD eindringlich vor negativen Wirkungen von Bioenergie auf die biologische Vielfalt.

Im Vorfeld der COP-9 in Bonn schien das Thema blockiert. Die COP-9 brachte einen Teilerfolg für die EU, da ein eigenständiger Beschluss zu Biokraftstoffen gefasst wurde, in dem das Prinzip Nachhaltigkeit bestätigt und der CBD eine Rolle bei diesem Thema zugesprochen wurde. Die von der EU angestrebte Aufgabe der CBD, konkrete Biodiversitätsleitlinien für die Entwicklung von Standards zu erarbeiten, wurde jedoch verzögert. Die CBD wird sich bis zur COP-10 im japanischen Nagoya (Herbst 2010) lediglich im Rahmen von regionalen Workshops damit befassen, wie die positiven Wirkungen von Biokraftstoffen auf die Biodiversität gefördert und die negativen gemindert werden können. Welchen Beitrag die CBD zur Entwicklung von Standards leisten kann, wird erst nach der COP-10 endgültig eingeschätzt werden können (Loose und Korn, 2008).

Weitergehende Anforderungen an die CBD, langfristig entsprechende Leitlinien nicht nur für Bioenergie, sondern für sämtliche Formen der Biomasseproduktion zu entwickeln, sind derzeit noch kein konkretes Thema in der Konvention, nicht zuletzt

da einige Vertragsparteien einen Konflikt mit den WTO-Regelungen zum Freihandel sehen und Handelsbarrieren der Industriestaaten befürchten (Kap. 10.3.3 und 10.3.4).

10.5.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die COP-10 in Nagoya wird wahrscheinlich nicht um das Eingeständnis herum kommen, dass das 2010-Ziel, den Verlust biologischer Vielfalt signifikant zu vermindern, insgesamt nicht erreicht werden konnte. Angesichts zunehmender Landnutzungskonkurrenzen, die durch Bioenergie noch verstärkt werden, und dem dadurch ausgelösten zusätzlichen Druck auf die verbliebenen natürlichen Ökosysteme wird es in Zukunft eher schwieriger werden, angemessene Biodiversitätsziele zu erreichen. Es ist daher umso wichtiger, den notwendigen politischen Willen zu mobilisieren, um künftig in wirksamer und verbindlicher Form für die Erhaltung biologischer Vielfalt einzutreten.

Die Umsetzung des Arbeitsprogramms für Schutzgebiete zum Auf- und Ausbau effektiver nationaler Schutzgebietssysteme ist eine wichtige Voraussetzung, um das 2010-Ziel zu befördern. Die Bundesregierung hat als Gastgeber der COP-9 in Bonn einen vorbildlichen Schritt getan, indem sie zusätzlichen finanzielle Mittel zur Finanzierung des globalen Schutzgebietsnetzes in beträchtlicher Höhe zugesagt hat. Deutschland wird bei seinen Partnern unter den Industrieländern verstärkt für die LifeWeb-Initiative werben müssen, um die Initiative zu einem Erfolg zu führen. Gleichzeitig muss die Effektivität bisheriger Finanzierungsmechanismen und Mittelverwendungen erhöht werden. Ziel muss es sein, ein verlässliches und abgestimmtes internationales Finanzierungsregime für Schutzgebiete und den Biodiversitätsschutz insgesamt zu installieren. Nach Ansicht des WBGU könnte die LifeWeb-Initiative ein erster Schritt in Richtung eines internationalen Regimes von Schutz- und Zahlungspflichtungen in Form eines Marktes für zertifizierte Schutzleistungen sein. Zu diesem Zweck sollte als Langfristoption die Weiterentwicklung der CBD-Regelungen in Richtung auf ein Schutzgebieteprotokoll geprüft werden.

Der Prozess, im Rahmen der CBD Biodiversitätsleitlinien als Input für Nachhaltigkeitsstandards zu erarbeiten, sollte gefördert und so weit als möglich beschleunigt werden. Als wichtiger Beitrag sollte parallel dazu der Ausbau der Weltdatenbank zu Schutzgebieten (WDPA, 2008) gefördert werden, um die notwendigen Monitoringkapazitäten aufzubauen.

10.6 Wasser- und Bodenschutz im Kontext einer nachhaltigen Bioenergiepolitik

10.6.1 Bodenschutz und Desertifikationsbekämpfung: Möglichkeiten und Grenzen der UNCCD

Bioenergie ist ein neu aufkommendes Thema im Hinblick auf die Umsetzung der Konvention der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung (UNCCD), das auf mehreren Veranstaltungen der 8. Vertragsstaatenkonferenz bereits intensiv diskutiert wurde (IISD, 2007). Diskutiert wird v.a. die Potenziale des Energiepflanzenanbaus für die Einkommensgenerierung und zur Diversifizierung der Einkommensquellen, zur ländlichen Energieversorgung, zur Gewinnung von Exporterlösen und zur Desertifikationsbekämpfung durch Erosionsschutz und Wiederaufforstung. Dabei wird deutlich, dass die steigende Bioenergieproduktion und die damit verbundenen unerwünschten Effekte eine begleitende, steuernde Politik in den einzelnen Ländern erforderlich machen. In diesem Kontext bietet die UNCCD eine Plattform, um eine nachhaltige und auf Armutsbekämpfung orientierte Landnutzung in den von Dürren und Desertifikation betroffenen Ländern programmatisch bzw. konzeptionell zu unterstützen, v.a. über das Instrument der Nationalen Aktionsprogramme (NAPs) zur Desertifikationsbekämpfung. Im Rahmen von NAPs könnte auch die Anwendung von Standards für eine nachhaltige Bodennutzung, ganz konkret auch für den Anbau von Bioenergiepflanzen, befördert werden. Darüber hinaus bietet der 2007 verabschiedete 10-Jahres-Strategieplan der UNCCD zahlreiche Möglichkeiten, um Bewusstseinsbildung, Bewertung von Bioenergien, Standardsetzung gerade im Hinblick auf Desertifikationsbekämpfung sowie die Politikgestaltung für eine nachhaltige Bioenergienutzung im Allgemeinen zu befördern (Paquin, 2007; Pilardeaux, 2008). Dabei sind zwei Ziele besonders relevant:

- Die Verbesserung der Lebensbedingungen der von Dürre und Desertifikation betroffenen Bevölkerung: Der Anbau von Bioenergiepflanzen kann zur Diversifizierung der Einkommensquellen und zur Verbesserung der ländlichen Energieversorgung beitragen.
- Verbesserung des Zustandes degradierter Ökosysteme in Trockengebieten: Bioenergieproduktion kann zur Inwertsetzung marginaler und übernutzter Flächen beitragen und als Erosionsschutz die Desertifikationsbekämpfung unterstützen.

Unter dem Dach der Konvention könnte die Bewertung der Potenziale und Auswirkungen verschiede-

Kasten 10.6-1

Implikationen stofflicher Nutzung von Biomasse für die Politik

Aus der Analyse der stofflichen Nutzung von Biomasse nach einem Ausstieg aus fossilen Energieträgern bzw. Rohstoffen ergeben sich neue Anforderungen an die Gewinnung biogener Rohstoffe, aber auch an das Design der Produkte und eine Kaskadennutzung mit abschließender energetischer Nutzung (Kap. 5.3). Damit werden bzw. würden einmal mehr sektorale Anforderungen an Produkten gestellt, in Ergänzung anderer bereits formulierter sektoraler Anforderungen wie Energieeffizienz bei der Produktion, Energieeffizienz bei der Nutzung, Schadstoffentfrachtung, Ressourceneffizienz (bislang vor allem auf mineralische Rohstoffe bezogen) und Kreislaufwirtschaft. Basierend auf den genannten Anforderungen gibt es entsprechende Gesetze und Programme, wie etwa in der EU die Richtlinie für Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen (2006/32/EC), den Energieeffizienz-Aktionsplan (EEAP), die Ökodesign-Richtlinie, der Aktionsplan für Nachhaltigen Konsum, die Chemikalien-Richtlinie REACH oder die Ressourcenstrategie der EU. Vergleichbare Aktivitäten gibt es in anderen OECD-Ländern und mit einer gewissen Verzögerung auch in den Schwellenländern. Allerdings haben sich auch unerwünschte globale Ausweichstrategien etabliert – so wird etwa das Altauto-Recycling in der EU durch hohe Exporte nach Westafrika und Osteuropa unterlaufen, vergleichbar die Elektronikschrott-Entsorgung durch hohe Exporte und inadäquate Behandlung in China oder Indien. Ein anderes Bespiel ist der sehr hohe Papierverbrauch in den Industrieländern und die zum Teil massiv umweltzerstörende und klimabelastende Zellstoffgewinnung (die aber überraschenderweise – anders als bei den Biokraftstoffen – nicht im Fokus der politischen Diskussion steht).

Auch wenn es aus pragmatischen Gesichtspunkten durchaus sinnvoll sein kann, medienbezogene- oder sektorale Strategien und Instrumente zu konzipieren, wird doch immer mehr deutlich, dass eine neue integrierte Strategie erforderlich ist. Eine solche integrierte globale Produktstrategie sollte so gestaltet sein, dass sie nicht bei Teilprozessen ansetzt, sondern die Produkte in den Fokus nimmt, dabei die gesamte Produktlinie einbezieht und optimiert, die oben genannten multidimensionalen Anforderungen unter Beachtung von Zielkonflikten integriert bewertet und auch globale Aspekte berücksichtigt.

Elemente einer solchen Strategie wären:

- Szenarien für die Entwicklung der Stoffströme der globalen Massenprodukte, mit Ermittlung des Bedarfs an strategischen Ressourcen (Energieträger, auch stofflich zu nutzende Biomasse, ausgewählte mineralische Ressourcen) sowie der mit den Produkten ingesamt verbundenen globalen und regionalen Umweltbelastung einschließlich der Schadstoffbelastung, sowie Anfall von Sekundärrohstoffen und Abfällen,
- Ermittlung der Konkurrenzen bei der Nutzung von Biomasse für Ernährung und energetische und stoffliche Zwecke,
- Identifizierung von Innovationspotenzialen und Regulierungsbedarf,
- Setzung internationaler, gegebenenfalls auch regionenspezifischer Innovationsziele für Produkte sowie entsprechende Ausrichtung von Forschungs- und Technologieförderung und gegebenenfalls Marktanreizprogrammen,
- Setzung von Reduktionszielen und Ermittlung geeigneter Instrumente, mit dem Fokus auf eine integrierte globale Produktpolitik und dynamische Produktstandards – mit dem doppelten Ziel, Innovationen anzuregen und zu fördern sowie problematische Produkte zu regulieren,
- Neuentwicklung einer abfallwirtschaftlichen Strategie, welche die Kaskadennutzung „stofflich genutzte Biomasse mit anschließender energetischer Verwertung“ berücksichtigt.

ner Bioenergieformen in Trockengebieten durch das neu organisierte Committee on Science and Technology (CST) bearbeitet werden (Bauer und Stringer, 2008). Die Beobachtung und Bewertung der konkreten Auswirkungen lokaler und exportorientierter Bioenergieproduktion auf Nahrungspreise, Ernährungssicherheit und ländliche Einkommensstrukturen wäre eine Aufgabe für das Commitee for the Review of the Implementation of the Convention (CRIC) sowie das CST. Die Förderung von Standards für die Bioenergieproduktion in Trockengebieten und entsprechender Kennzeichnung könnten diese beiden Nebenorgane der Vertragsstaatenkonferenz (CST, CRIC) in Zusammenarbeit mit der Globalen Umweltfazilität (GEF) übernehmen. Die UNCCD bietet also eine Reihe von Möglichkeiten, um im Kontext des weltweiten Bioenergiebooms eine entwicklungsorientierte landwirtschaftliche Nutzung von Trockengebieten zu fördern und in nachhaltige Bahnen zu lenken. Um dabei institutionelle Fragmentierung und Redundanzen zu begrenzen und statt dessen Synergien zu fördern, sollten etwaige Maßnahmen, die im Kontext der UNCCD vereinbart werden, von vornherein mit den Instrumenten zur Implementierung der Biodiversitätskonvention (CBD) abgestimmt sein. Besonderes Augenmerk sollte auch auf eine bessere inhaltlichen Verzahnung der UNFCCC National Adaptation Programmes of Action (NAPAs) und der NAPs liegen. Auch bei Prozessen der Standardsetzung außerhalb multilateraler Institutionen sollte das in der UNCCD verortete Wissen integriert werden.

Die UNCCD bietet grundsätzlich einen geeigneten Rahmen, um allgemeine internationale Strategien zur Bewältigung der Herausforderungen des Klimawandels mit den spezifischen Bedürfnissen in Trockenregionen lebender Menschen zu verknüpfen. Der Konventionsprozess sieht zwar kein Mikromanagement auf Projektebene vor, kann aber dahingehend Unterstützung für die Politikgestaltung auf lokaler und nationaler Ebene leisten, Anpassung an den Klimawandel sinnvoll mit Desertifikationsbekämpfung zu verknüpfen – auch durch den Anbau von Energiepflanzen. Eine Umsetzung der Konven-

tion in diesem Sinne setzt allerdings voraus, dass die Vertragsstaaten den begonnen Reformprozess unterstützen und die 10-Jahres-Strategie zügig umsetzen. Als Institution, deren Wirkungsbereich sich weitgehend auf Trockengebiete beschränkt, kann sie die Maßnahmen anderer internationaler Institutionen im Bereich der ländlichen Entwicklung, des Artenschutzes und der Anpassung an den Klimawandel gezielt ergänzen.

Die Umsetzung der NAPs sowie die Entwicklung einer Bioenergiestrategie im Kontext der Desertifikationsbekämpfung sollte in die übergreifende nationale Entwicklungsstrategie eines Landes, wie etwa den PRSP, eingebunden werden.

10.6.2 Schutz und nachhaltige Nutzung von Süßwasser

Durch die weltweit wachsende Bedeutung der Bioenergie geraten die wachsenden Nutzungsansprüchen ausgesetzten Süßwasserressourcen (v.a. zur Nahrungsproduktion) zunehmend unter Druck. Die Wirkungen des Klimawandels und die Bodendegradation werden diesen Druck weiter erhöhen (IPCC, 2007b; FAO, 2008d). Die High Level Task Force on the Global Food Crisis der Vereinten Nationen weist in ihrem 2008 vorgelegten Strategieentwurf „Elements of a Comprehensive Framework for Action“ auf die steigende Nutzungskonkurrenz um Süßwasser durch den globalen Bioenergieboom hin und empfiehlt u.a. die Erarbeitung von Standards, in denen auch die nachhaltige Nutzung von Süßwasser und die prioritäre Nutzung für die Nahrungsproduktion verankert werden sollen (UN, 2008).

Die globalen Süßwasserressourcen sind ein bislang weit gehend ungeregelter Bereich der internationalen Politik, es gibt keine völkerrechtlichen Vereinbarungen wie etwa für Klima, Biodiversität oder Bodenschutz in Trockengebieten (Pilardeaux, 2004). Gleichzeitig machen die bisher beobachteten Trends deutlich, dass durch den wachsenden Nutzungsdruck dringender Regelungsbedarf für den Schutz und die nachhaltige Nutzung von Süßwasserressourcen besteht.

Ein bedeutsames internationales Forum, das sich mit Fragen der Wasserpolitik befasst, ist das im dreijährigen Rhythmus tagende Weltwasserforum. Das Weltwasserforum ist ein Gremium, bei dem internationale Wasserexperten, Entscheidungsträger, Wissenschaftler sowie Interessenvertreter aus internationalen Organisationen zu einem Stakeholderforum regelmäßig zusammentreffen. Dahinter steht der 1996 gegründete Weltwasserrat (www.worldwatercouncil.org). Der Weltwasserrat ist eine Plattform für Akteure in der internationalen Wasserpolitik, darunter Regierungsvertreter, Parlamentarier, NROs, Vertreter der Privatwirtschaft, der Wissenschaft, der Entwicklungszusammenarbeit und der Vereinten Nationen. Enge Beziehungen bestehen zur UNESCO. Der Rat will zur besseren Beachtung des Themas durch die Politik beitragen, die Debatte um eine nachhaltige Wasserpolitik unterstützen, konkrete Handlungsoptionen erarbeiten helfen und die Staaten zu verpflichtenden Vereinbarungen anregen. Bisher hat sich das Weltwasserforum noch nicht mit den Folgen des Anbaus von Energiepflanzen für die Wassernutzung befasst, es ist allerdings sehr wahrscheinlich, dass das Thema auf der Tagesordnung des Weltwasserforums im Jahr 2009 stehen wird.

Die Vereinten Nationen sind gleichfalls mit dem Thema Schutz und nachhaltige Nutzung von Süßwasser im Rahmen der Veranstaltungen der Kommission zur Nachhaltigen Entwicklung (CSD – Commission on Sustainable Development) befasst. Im zweijährlichen Rhythmus finden so genannte politische Treffen statt, dazwischen jeweils Review-Treffen. Das letzte Review-Treffen der Kommission für Nachhaltige Entwicklung (CSD 16) fand im Mai 2008 in New York (USA) statt und behandelte die Themen Landwirtschaft, Ländliche Entwicklung, Land, Dürre, Wüstenbildung und Afrika. Die Diskussion während der CSD umfasste sowohl Integriertes Wasserressourcenmanagement (IWRM) als auch den Zugang zu Wasser- und Sanitärversorgung (Millenium Development Goals, MDG’s). Die Ergebnisse werden Grundlage der Verhandlungen zu Politikempfehlungen für die CSD 17 im Jahr 2009 sein, um die Arbeiten zur Erreichung der Wasser-MDGs zu intensivieren. Eine erneute Review-Session zum Thema Wasser und sanitäre Grundversorgung soll bei der CSD 20 in 2012 stattfinden. Eine Regelungswirkung für den Süßwasserbereich ist von den CSD-Aktivitäten kaum zu erwarten, da es sich hier im Prinzip um ein Dialogforum handelt, das wegen seiner fehlenden Durchsetzungs- und Gestaltungskraft wiederholt in der Kritik stand (Maier, 2007).

Der Weltgipfel für Nachhaltige Entwicklung in Johannesburg verpflichtete 2002 die internationale Staatengemeinschaft, den Anteil der Weltbevölkerung ohne Zugang zu unbedenklichem Trinkwasser und zu sanitärer Grundversorgung bis 2015 zu halbieren. In Infolgedessen sind die verschiedene Organisationen der Vereinten Nationen (z.B. WHO, FAO, UNDP usw.) auf dem Wassersektor aktiv, um das Thema Schutz und nachhaltige Nutzung von Süßwasser zu unterstützen und den Prozess einer besseren und nachhaltigen sanitären Grundversorgung zu forcieren, damit die Zielsetzung von Johannesburg für 2015 erreicht wird.

10.7 Staatliche Förderung der Bioenergie: Agrar- und industriepolitische Maßnahmen

Staatliche Förderpolitiken in Industrie- und Entwicklungsländern beeinflussen Art und Ausmaß der Bioenergienutzung maßgeblich. Entlang der gesamten Produktions- und Wertschöpfungskette kommen verschiedene fördernde ordnungsrechtliche Instrumente und fiskalische Instrumente zum Einsatz. Im Wesentlichen geht es darum, eine Förderung von nichtnachhaltiger Produktion und Nutzung von Bioenergie zu beseitigen und zugleich besonders nachhaltige Anbau- und Nutzungspfade zu fördern. Dabei sollte das Augenmerk nicht allein auf die direkte Förderung des nachhaltigen Anbaus von Energiepflanzen, die Mobilisierung von organischen Abfällen und Reststoffen sowie die Erleichterung des Marktzugangs biogener Energieträger oder bestimmter Konversions- und Nutzungstechnologien gerichtet sein. Vielmehr gilt es auch kritisch zu beleuchten, welche indirekten Anreize oder sogar Fehlanreize von anderen Politikmaßnahmen auf den Einsatz von Bioenergie ausgehen. Grundsätzlich sollte eine Vielzahl von z. B. umwelt-, energie-, agrar- und wirtschaftspolitischen Maßnahmen und Rahmensetzungen darauf hin geprüft werden, welchen Einfluss sie auf die Wahl der (Bio-)Energieträger und Nutzungspfade ausüben. Der WBGU geht dazu beispielhaft auf einige wesentliche Bereiche ein, nämlich Maßnahmen zur Internalisierung externer Klimaeffekte, speziell den Emissionshandel und den internationalen klimapolitischen Rahmen (Kap. 10.7.1) sowie auf Energiesubventionen (Kap. 10.7.7.3).

10.7.1 Förderung von Bioenergiepfaden durch den klimapolitischen Rahmen

Im Hinblick auf die Klimaschutzwirkung der Bioenergie (Kap. 7.3) sind die klimapolitischen Rahmensetzungen auf internationaler und nationaler Ebene von besonderer Bedeutung. Bisher unterliegen vor allem energieintensive Industriesektoren in Industrieländern und zunehmend auch in Schwellenländern nationalen Gesetzgebungen zum Klimaschutz. Um global und sektorübergreifend wirksame Anreize für eine effiziente Vermeidung von Treibhausgasemissionen zu setzen, müssten idealerweise alle Emissionen in allen Ländern und aus allen Sektoren erfasst werden. Außerdem müssten alle Emissionen im Rahmen von Emissionshandelssystemen begrenzt bzw. durch Abgaben so belastet werden, dass die externen Klimakosten der Emissionen vollständig internalisiert wären, d.h. die einzelnen Emittenten würden durch den Kauf von Zertifikaten oder durch Abgaben die gesamten Kosten ihrer Emissionen tragen. Damit nähme die Wettbewerbsfähigkeit von Bioenergiepfaden mit hoher Klimaschutzwirkung zu. Darüber hinausgehende Fördermaßnahmen für nachhaltige Bioenergienutzungspfade wären ebenso wie die Förderung anderer nachhaltiger erneuerbarer Energien grundsätzlich nicht erforderlich. Eine staatliche Förderung ließe sich dann lediglich in gut begründeten Einzelfällen rechtfertigen, etwa bei Technologien mit sehr hohem Treibhausgaseinsparpotenzial und hohen Lernkurveneffekten, jedoch zugleich hohen Anfangskosten, die den Markteintritt hemmen. Alles in allem könnte sich der Staat aus der gezielten Förderung von klimaschutzwirksamen Energiepfaden einschließlich Bioenergiepfaden heraus halten. Die Auswahl der Energiepfade würde stattdessen maßgeblich durch die Preise auf dem (globalen) Kohlenstoffmarkt bestimmt.

Die skizzierte idealtypische Umsetzung eines sektorübergreifenden internationalen Emissionshandels ist aus politischen Gründen nicht absehbar. Aber auch andere Barrieren stehen dem entgegen: Die Zuordnung aller im Bioenergiebereich anfallenden Emissionen auf einzelne Emittenten und vor allem die Integration solcher Emissionen in ein allgemeines Handelssystem, in dem Individuen Emissionsrechte handeln, dürfte kaum praktikabel sein oder nur mit unverhältnismäßig hohen Kosten und Eingriffen. Dennoch muss es das Ziel sein, langfristig einen klimapolitischen Rahmen zu schaffen, in dem die externen Kosten der Energiepfade von der Wiege bis zur Bahre der Energieträger vollständig internalisiert werden. Ein erster Schritt dorthin im Zusammenhang mit Bioenergie ist, dass Fehlanreize durch die Erfassungs- und Anrechnungsverfahren in bestehenden Systemen zur Emissionsregulierung beseitigt werden.

Aufgrund der derzeitigen Erfassungs- und Anrechnungsregelungen der UNFCCC, wonach Emissionen aus der Verbrennung von Energiepflanzen nicht dem Ort und Sektor der Emission angerechnet werden (Kap. 10.2), ergibt sich eine indirekte Förderung von Nutzungen der Bioenergie, die klimaschädlich sind (Doornbosch und Steenblik, 2007). Um solche kontraproduktiven Förderungen von Bioenergie zurückzuführen, müssen die UNFCCC-Verfahren zur Erfassung und Anrechnung biogener CO_2-Emissionen reformiert werden (Kap. 10.2). Auf nationaler bzw. europäischer Ebene sollten derartige Anrechnungslücken zügig geschlossen werden. Solange die Anrechnungsverfahren für biogene Treibhausgasemissionen in z. B. Emissionshandelssystemen nicht entsprechend entwickelt oder angepasst sind, sollten zumindest Nachhaltigkeitsstandards für Bioenergie konzipiert und umgesetzt werden, die sicherstellen,

dass die Nutzung von Bioenergie verhindert wird, wenn sie keinen erkennbaren Beitrag zur Reduktion von globalen Treibhausgasemissionen leistet (Kap. 10.3).

10.7.2 Förder- und Interventionsansätze im Rahmen einer nachhaltigen Bioenergiepolitik

Aus Sicht des WBGU sollte die Bioenergienutzung vor allem an ihrem Beitrag zu einer globalen Energiewende zur Nachhaltigkeit, insbesondere den Zielen Klimaschutz und Beseitigung von Energiearmut, bewertet werden (Kap. 2.2). Dies erfordert eine differenzierte Betrachtung nach Nutzungspfaden (Kap. 5, 7 und 8). Angesichts der Risiken, die von der Bioenergienutzung ausgehen können (Kap. 5 und 7.3), ist eine undifferenzierte Förderung von Bioenergie nicht angezeigt. Bioenergieträger, die nicht bestimmten Mindeststandards zur Nachhaltigkeit genügen (Kap. 10.3.1.2), sollten weder direkt noch indirekt gefördert werden. Vielmehr sollte die Nutzung von Bioenergieträgern, die nicht dem vom WBGU vorgeschlagenen Mindeststandard (Kap. 10.3.1.1) genügen, langfristig durch ein umfassendes und effektives Regulierungssystem idealerweise weltweit unterbunden werden (Kap. 10.3–Kap. 10.6).

Soweit die Bioenergieträger dem Mindeststandard entsprechen, sollte ihr Anbau grundsätzlich dem Markt überlassen werden. Einer expliziten staatlichen Förderung ihres Anbaus bedarf es im Allgemeinen nicht. Ergänzend ist jedoch durch geeignete Rahmensetzungen – etwa beim Klimaschutz (Kap. 10.2), der Internalisierung externer Umweltkosten, in den Bereichen Landwirtschaft und Ernährung (Kap. 10.4), Natur- und Bodenschutz (Kap. 10.5 und 10.6) – sicherzustellen, dass der Marktmechanismus zu Ergebnissen führt, die mit den Zielen einer global nachhaltigen Bioenergiepolitik in Einklang stehen. Explizit förderungswürdig sind aus Sicht des WBGU grundsätzlich nur solche Bioenergiepfade, die besonders vorteilhaft auf den Klimaschutz und andere Nachhaltigkeitsziele wirken. Das bedeutet erstens, dass nicht nur der Mindeststandard eingehalten wird, sondern dass durch den Einsatz der Bioenergie unter Berücksichtigung der gesamten Lebenszyklusemissionen mindestens 60 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Biomasse eingespart werden können (Kap. 9.2.1). Die Feststellung dieses Kriteriums kann streng genommen erst bei der Endnutzung der Bioenergie stattfinden. Solch eine Prüfung würde jedoch einen hohen Kontrollaufwand hervorrufen. Außerdem wäre ungewiss, ob sich die Förderung am Schluss der Wertschöpfungskette tatsächlich auf den gesamten Bioenergiepfad durchschlägt. Zudem muss berücksichtigt werden, dass sich die einzelnen Stufen des Produktions- und Nutzungsprozesses (Anbau-, Konversions- und Anwendungssysteme) in verschiedenen Ländern befinden können. Daher hält es der WBGU für angebracht, Förderinstrumente zwar an jeder Stufe des Prozesses einzusetzen, aber in der Regel mit Standardannahmen über die jeweils anderen Stufen zu arbeiten.

Speziell im Hinblick auf eine Förderung des Anbaus von Energiepflanzen erachtet es der WBGU als zweitens erforderlich, dass zusätzlich ökologische und soziale Kriterien erfüllt sein müssen (Kap. 10.3.1.2). Bei der Mobilisierung biogener Reststoffe sollten ebenfalls ökologische Grenzen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit berücksichtigt werden (Kap. 10.7.4). Drittens und schließlich sollte die Förderung von Konversions- und Anwendungssystemen so gestaltet werden, dass sie sich in das Leitbild der Energiewende zur Nachhaltigkeit einfügt, ungewünschte Pfadabhängigkeiten sollten vermieden und zukunftsträchtige Technologien wie z.B. Elektromobilität gefördert werden (Kap. 9).

Nachhaltigkeit der Energiesysteme umfasst außer dem Klimaschutz u.a. auch die Überwindung der Energiearmut sowie den Ausstieg aus gesundheitsschädlicher Biomassenutzung (Kap. 3). Die Modernisierung der netzunabhängigen bzw. traditionellen Nutzung von Bioenergie kann besonders im ländlichen Raum von Entwicklungsländern zur Überwindung von Energiearmut und Gesundheitsgefährdungen einen wertvollen Beitrag leisten. Hier erscheint dem WBGU eine Förderung von bioenergiebasierten Projekten auch dann gerechtfertigt, wenn die Klimaschutz- und Förderkriterien nicht voll erfüllt werden (Kap. 10.8).

10.7.3 Landwirtschaftspolitik: Förderung des Anbaus von Biomasse für energetische Nutzungen

Aktuelle Förderpolitiken für den Anbau von Energiepflanzen und besonders für ihre Nutzung als flüssige Biokraftstoffe im Verkehr spiegeln kaum wider, dass je nach Anbauverfahren, aber auch je nach Konversionsverfahren und Nutzung unterschiedliche Beiträge zur Vermeidung von Treibhausgasen und damit zum Klimaschutz geleistet werden (Kap. 7; SRU, 2007). Gleiches gilt für andere Nachhaltigkeitsaspekte (Kap. 9; Doornbosch und Steenblik, 2007). Der WBGU plädiert dafür, dass ein eindeutig nichtnachhaltiger Anbau durch die Staaten aktiv unterbunden wird. Um dies zu erreichen, müssen Mindeststandards weltweit implementiert werden. Da allerdings kurz- bis mittelfristig nicht damit zu rechnen ist, dass sich die Staatengemeinschaft auf anspruchsvolle

Standards für den Anbau einigt bzw. diese umsetzt, empfiehlt der Beirat, dass zumindest in der EU ein verbindlicher Mindeststandard für Bioenergieträger zügig vereinbart wird (Kap. 10.3). Nur wenn dieser erfüllt ist, sollten Bioenergieträger in der EU für die Energieerzeugung genutzt werden dürfen.

10.7.3.1 Bestimmte Anbaumethoden und bestimmte Ökosystemleistungen bevorzugen

Die EU fördert derzeit den Anbau von Energiepflanzen im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) mit einer Beihilfe in Höhe von jährlich 45 € pro ha (EU, 2003). Bei geeigneter klimaschutzpolitischer Rahmensetzung, funktionierenden Internalisierungsmechanismen und weltweit implementierten Mindeststandards bestünde nach Auffassung des WBGU kein klimaschutzpolitisch begründeter Bedarf für eine spezielle Förderung des Anbaus von Energiepflanzen. Vielmehr würden die Marktprozesse dafür sorgen, dass sich das wirtschaftlich und klimapolitisch nachhaltige Potenzial der Bioenergie entfaltet. Förderungswürdig wären dann nur Anbaumethoden, die über den Klimaschutz hinaus besonders nachhaltig sind, wenn sie also wesentliche Beiträge etwa zur Erosionsbekämpfung, (Energie-) Armutsreduzierung oder der Erhaltung von Biodiversität leisten. Solchen Förderkriterien würde z.B. der sozialverträgliche Anbau geeigneter mehrjähriger Energiepflanzen auf degradierten Flächen genügen.

Eine Förderung kann mittels Agrarsubventionen, wie z.B. Anbauprämien erfolgen. Ergänzend oder alternativ kommt die Förderung zur Diffusion von Landbearbeitungstechniken oder Agrartechnologien in Frage, welche die wirtschaftlichen Voraussetzungen für besonders nachhaltige Anbausysteme verbessern. So können z.B. finanzielle und technische Fördermaßnahmen die Wirtschaftlichkeit des kleinbäuerlichen Waldfeldbaus in tropischen Regionen verbessern (Kap. 7.1.3) oder die Anwendungen für eine nachhaltige Restholz- und Waldnutzung in temperaten und borealen Wäldern unterstützen (Kap. 7.1.5.2 und 7.1.5.3). Um den nachhaltigen Anbau zu fördern, ist es grundsätzlich auch denkbar, an der Verwendung von Biomasse anzusetzen, z.B. durch Handels- oder Steuervorteile bei der energetischen Nutzung entsprechender Energiepflanzen (Kap. 10.3).

10.7.3.2 Internationale Initiativen

Die Umgestaltung nationaler Förderprogramme für den Anbau von Energiepflanzen sollte durch internationale Koordination verstärkt und beschleunigt werden. Mit den bestehenden Förderungen von vielfach nicht nachhaltiger Biomasseproduktion werden Anreize zur Landdegradation und Zerstörung von Biodiversität verstärkt (OECD, 2008). Außerdem wird der Preismechanismus auf den (globalen) Energie- und Agrarmärkten verzerrt, wovon unerwünschte Nebenwirkungen etwa auf die Nahrungsmittelversorgung oder den Einsatz anderer erneuerbarer Energien ausgehen können. Schließlich spricht auch die Vermeidung eines ineffizienten Förder- und Subventionswettlaufs für eine internationale Vereinbarung über Prinzipien für Anbausubventionen. Ohne internationale Regelung würde eine ähnliche Situation entstehen, wie sie vor längerer Zeit schon durch die bestehenden Agrarsubventionen geschaffen wurde, nämlich dass ärmere Entwicklungsländer ihrer wirtschaftlichen Entwicklungschancen beraubt würden, die ihnen der Energiepflanzenanbau und der Export von Bioenergieträgern eröffnen könnte.

Eine Korrektur solcher Förderungen, vor allem der Agrar- und Bioenergiesubventionen, muss idealerweise in einem holistischen Ansatz erfolgen. Energie-, Agrar- und Umweltpolitik müssen nach Möglichkeit ressortübergreifend abgestimmt werden. Auf internationaler Ebene könnte die Abstimmung analog zu den übrigen Agrarsubventionen im Rahmen der WTO stattfinden, allerdings unter Einbindung anderer Organisationen wie etwa UNEP, FAO, GBEP, CBD, UNCCD und gegebenenfalls der UNFCCC. Eine solche Einbindung ist notwendig, damit aussagekräftige Nachhaltigkeitskriterien in die Vereinbarungen Eingang finden, die festlegen, wann eine Anbauförderung weiterhin zulässig ist. Dies könnten Fördermaßnahmen aus Gründen der Bekämpfung von Landdegradation und Desertifikation (Kap 10.6), des Natur- und Klimaschutzes (Kap. 10.5 und 10.2) oder der Beseitigung von Energiearmut (Kap. 10.8) sein.

10.7.4 Förderung der energetischen Verwertung biogener Abfälle und Reststoffe

Für eine Förderung der energetischen Nutzung von Biomasseabfällen und Reststoffen, die neben Energiepflanzen die Rohstoffbasis für die Bioenergienutzung bilden (Kap. 4.1), müssen ihre besonderen Gütereigenschaften berücksichtigt werden. Biogene Abfälle und Reststoffe liegen in verschiedenen

Aggregatzuständen vor, z.B. als feste oder flüssige Brennstoffe (Restholz, Gülle, Stroh, Bioabfall). Biogene Abfälle und Reststoffe fallen in unterschiedlichen Sektoren an (Agrar- und Forstwirtschaft, verarbeitendes Gewerbe, kommunale Betriebe und private Haushalte) und entstehen an unterschiedlichen Stufen der Wertschöpfungskette (Biomasseproduktion und -ernte, Verarbeitung, Verbrauch und Entsorgung; EEA, 2006; Sims et al., 2007).

Mobilisierung biogener Abfälle und Reststoffe für die energetische Nutzung

Der energetischen Nutzung biogener Abfälle und Reststoffe sollte aufgrund ihrer vorteilhaften Klimaschutzwirkung (Kap. 7) im Vergleich zum Energiepflanzenanbau eine prioritäre Rolle in der Bioenergienutzung zukommen (Kap. 9.1.1). Ein Engpassfaktor kann dabei die Rohstoffverfügbarkeit sein. Handlungsbedarf besteht, wenn nachhaltige Potenziale vorhanden sind, die bisher nicht ausgeschöpft wurden, weil die erforderlichen Infrastrukturen zur Sammlung und Verarbeitung, d.h. vor allem zur Abfall- und Reststofftrennung und (Zwischen-)Lagerung, fehlen, Informationsdefizite bestehen oder die energetische Nutzung bisher nicht wirtschaftlich betrieben werden konnte, weil z. B. der Abfall-/Reststofftransport zwischen Entstehungsort und Konversionsanlagen zu hohe Kosten verursacht. Zwar dürfte die absehbare Verteuerung fossiler Energieträger (Öl, Gas) die Wirtschaftlichkeit biogener Abfälle und Reststoffe langfristig verbessern und so zur Mobilisierung bisher genutzter Potenziale beitragen, angesichts der Dringlichkeit des Klimaschutzes empfiehlt der WBGU jedoch außer durch die Internalisierung der Kosten fossiler Energieträger die Mobilisierung von biogenen Abfällen und Reststoffen gezielt zu fördern, damit dieser Substitutionsprozess beschleunigt wird.

Verfügbarkeit geeigneter Konversionstechnologien

Die erforderlichen Konversionstechnologien, wie z.B. Biogasanlagen für Ernterückstände, Grünschnitt, Gülle und Lebensmittelabfälle sowie Biodieselanlagen für Alt- und Tierfett sind ebenso verfügbar wie Biomasseheizkraftwerke oder Pelletheizungen für holz- oder halmartige Abfälle und Reststoffe einschließlich des zu ihrem Betrieb erforderlichen Knowhow. Somit bedürfen diese Konversionstechnologien zumindest in Industrieländern keiner direkten Förderung über Subventionen, staatliche Markteinführungsprogramme oder ähnliches. Eine direkte Förderung dieser Anlagen würde außerdem nicht allein die Nachfrage nach biogenen Abfall- und Reststoffen stärken, sondern käme – je nach Technologie – unbeabsichtigt auch anderen Energieträgern, wie Energiepflanzen (Kap. 10.7.3) zu Gute. Eine Lenkung der biogenen Abfall- und Reststoffströme in die Stromerzeugung und Kohlesubstitution, wodurch sich die höchsten Treibhausgasminderungen erzielen lassen (Kap. 7.3 und 9.2.1), wird in Kapitel 10.7.5 näher begründet.

Förderung zur Ausschöpfung ungenutzter nachhaltiger Potenziale

Für biogene Abfall- und Reststoffe existieren nur wenige globale Potenzialabschätzungen, die zum Teil mit hoher Unsicherheit behaftet sind (Kap. 6.1.2). Vorliegende Studien weisen tendenziell deutlich höhere Abfall- und Reststoffpotenziale im Agrar- und Forstsektor aus als in den übrigen Sektoren (Tab. 6.1-1). Untersuchungen für EU-Mitgliedsstaaten (EU-25) weisen im Durchschnitt ebenfalls auf das Potenzial dieser Sektoren hin, wenn auch die sektorale Aufteilung und vor allem die Größenordnungen zwischen den einzelnen Ländern deutlich divergieren (EEA, 2006). Eine Förderung sollte dort ansetzen, wo signifikante ungenutzte, nachhaltige Potenziale vorhanden sind. Dieses Erschließungspotenzial stellt sich je nach der wirtschaftlichen Bedeutung der biomasseintensiver Sektoren (Umfang biologischer Ressourcen in Produktionsprozessen) sowie dem Organisationsgrad der Abfallwirtschaft (funktionsfähige Infrastrukturen, Kapazitäten für Weiterverwertung, Recycling, energetische Verwertung oder Deponierung) in den Länder unterschiedlich dar. Zum Beispiel werden in Deutschland die Potenziale in der Forst-, Holz- und Papierwirtschaft sowie Industrie- und Abfallwirtschaft nahezu vollständig genutzt. Eine Potenzialausschöpfung im Agrarbereich, z.B. bei Stroh, ist dadurch beschränkt, dass eine erhöhte Entnahme von Reststoffen die Bodenfruchtbarkeit (Humusgehalt) einschränken würde. In welchem Maße Stroh auf dem Acker verbleiben soll, hängt wesentlich von Standort, Fruchtfolge und Gabe sonstiger organischer Dünger ab. Erfahrungswerte für den Strohbedarf auf dem Acker liegen bei 67–80 % (Fritsche et al., 2004; Knappe et al., 2007; Vogt et al., 2008). Ähnliche Beschränkungen gelten für die Entnahme aus Wäldern und sollten unbedingt berücksichtigt werden. Betrachtet man das gesamte Energiepotenzial von Restholz in europäischen Wäldern, dann empfiehlt EEA (2007a), dass unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten 40 % dieses Nutzungspotenzials in den Wäldern verbleiben sollen. Wenn diese Restriktionen im Zuge des grundsätzlich gewollten Anstiegs der Reststoffnutzung seitens der Land- bzw. Forstwirte nicht hinreichend berücksichtigt werden, sollte auf Auflagen zurückgegriffen werden.

Die bislang ungenutzten, nachhaltigen Abfall- und Reststoffpotenziale können für die energeti-

sche Nutzung wirtschaftlich attraktiv gemacht werden, indem ihnen durch staatliche Fördermaßnahmen ein (zusätzlicher) ökonomischer Wert verliehen wird. Im Vordergrund der Politik zur (indirekten) Förderung der energetischen Nutzung von biogenen Abfällen und Reststoffen steht in den meisten Ländern die allgemeine Förderung erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung, teils kombiniert mit Fördermaßnahmen im Bereich der lokalen Wärmebereitstellung (Kraft-Wärme-Kopplung; DEFRA, 2007). Bei Einspeisevergütungen, aber auch bei Ausschreibungs- und Quotenmodellen, sollte durch Differenzierung die Attraktivität von Abfall- und Reststoffen im Vergleich zu Energiepflanzen verstärkt werden (Vogt et al., 2008; Kap. 10.7.5). Alternativ zu dieser Förderung kämen direkte Anreize (z.B. Subventionierung des Sammelns oder Transports) oder Auflagen (z.B. Deponierungsverbot) zur Mobilisierung ungenutzter Potenziale in Betracht. Die klimaschutzpolitische Effektivität solcher unmittelbar angebotserhöhender Maßnahmen wäre indes geringer als die Förderung über die Stromerzeugung, da derart subventionierte Reststoffe und Abfälle auch für Zwecke eingesetzt würden, die ein geringeres Treibhausgaseinsparpotenzial aufweisen. Daher sollten solche Maßnahmen, die direkt das Angebot erhöhen, keinesfalls alternativ, sondern lediglich zusätzlich zu Maßnahmen, die die Stromerzeugung aus Abfällen und Reststoffen fördern, erwogen werden (Kap. 10.7.5).

Direkte und indirekte Lenkung biogener Stoffströme

In Industrieländern lässt sich die Verfügbarkeit biogener Abfall- und Reststoffe für die energetische Nutzung dadurch unterstützen, dass eine weitere Deponierung dieser Stoffe durch steigende Deponiegebühren oder strenge Auflagen weniger attraktiv gemacht oder ganz ausgeschlossen wird. Strenge Regulierungen sind in diesem Zusammenhang sinnvoll, um in erster Linie das unkontrollierte Entweichen von klimawirksamem, methanhaltigem Deponiegas zu reduzieren. Anreize für die kontrollierte Gaserfassung und energetische Nutzung von Deponiegas aus vorhandenen, unbehandelten Deponieabfällen werden, ebenso wie für die energetische Nutzung von Klärgas, durch die Förderung der erneuerbaren Energien gesetzt.

Eine verstärkte Förderung biogener Abfall- und Reststoffe in der energetischen Verwendung trägt u.U. nicht nur zur Erschließung ungenutzter Potenziale bei, sondern auch zur Umlenkung von Stoffströmen aus bestehenden Verwendungen, vor allem der stofflichen Weiterverwertung und Wiedergewinnung. Beispiele für diese Verwendungen sind die Spannplattenproduktion aus Altholz (Bensmann, 2004), die Bodenverbesserung aus Klärschlamm oder kompostierten Gartenabfällen und Speiseresten (Knappe et al., 2007) sowie die angestrebte Rückgewinnung von Phosphor z.B. aus Gülle (UBA, 2004). Potenzielle Konkurrenzen um die Abfallressourcen lassen sich durch eine über Abfallgesetze gesteuerte Kaskadennutzung reduzieren oder müssen nicht notwendigerweise bestehen, da qualitativ minderwertige Abfallressourcen oftmals für eine stoffliche Nutzung nicht in Frage kommen, wie z.B. Schwachholz im Forstsektor (Fritsche et al., 2004). Dennoch muss eine Förderung der energetischen Abfall- und Reststoffnutzung die Ressourcenkonkurrenzen im Blick behalten.

Förderpolitik für Schwellen- und Entwicklungsländer

Die bestehende Abfall- und Reststoffnutzung in urbanen Zentren der Schwellen- und Entwicklungsländer stellt besondere Anforderungen an eine spezifische Förderung für die energetische Nutzung: Eine mehr oder weniger kontrollierte Verbrennung ungetrennter Siedlungsabfälle erfolgt oft zur Abfallentsorgung und weniger zur Energiegewinnung. Teilweise werden Abfälle bestenfalls ungetrennt deponiert. Obwohl organische Bestandteile immer noch den Hauptteil der Siedlungsabfälle ausmachen, liegt der Schwerpunkt der Abfalltrennung auf nichtorganischen Wertstoffen (Metalle, Glas, Kunststoffe) und deren Weiterverwendung oder Recycling. Schließlich hat der informelle Sektor (Kleinunternehmer, ärmere Haushalte) eine starke Rolle in der dezentralen Sammlung und manuellen Trennung der Abfälle (Bogner et al., 2007; Brock, 2008; Weltsichten, 2008).

Ansatzpunkt einer verstärkten Förderung durch nationale Programme und massive Unterstützung durch die Entwicklungszusammenarbeit kann die Verbreitung effizienter Konversionstechnologien einschließlich des für den Betrieb erforderlichen Knowhows sein. Im Mittelpunkt könnten (Gemeinschafts-)Anlagen für die von Energiearmut betroffenen Bevölkerungsgruppen stehen (Kap. 10.8). Die dafür erforderliche Mobilisierung organischer Abfälle könnte über verbesserte Infrastrukturen sowie – trotz Problemen in der Vergangenheit – über transparente Anreizsysteme für das Sammeln und Trennen derartige Abfälle verbessert werden, z.B. durch ein funktionsfähiges staatliches Entlohnungssystem für informelle Müllsammler. Zusätzlich könnten nach Einkommen gestaffelte Entsorgungsgebühren erhoben werden (Brock, 2008; Weltsichten, 2008). Schließlich geht es auch um die kontrollierte Erfassung von Biogas aus Deponien und Kläranlagen. Die Mittel für die dazu erforderlichen Investitionen lassen sich u.a. durch CDM-Projekte mobilisieren, sofern die Projektaktivitäten dazu beitragen,

zusätzliche Treibhausgasemissionen zu reduzieren (Bogner et al., 2007; Kap 10.2.3).

In ländlichen Regionen in Entwicklungsländern werden vor allem Abfall- und Reststoffe aus dem Agrar- und Forstsektor für die dezentrale Wärmebereitstellung verwendet – häufig mit ineffizienten Technologien der traditionellen Biomassenutzung (Kap. 8.2). Ziel einer nationalen Förderung sowie Förderung im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit, muss es sein, das Wissen um Nachhaltigkeitsgrenzen bei der Entnahme von Reststoffen aus Wäldern und von Äckern zu verbreiten bzw. lokale Institutionen zu fördern, die die Einhaltung von Nachhaltigkeitsstandards gewährleisten. Des Weiteren gilt es die Verbreitung effizienter Nutzungstechnologien wie moderner Holzherde und Kleinbiogasanlagen sowie den Übergang zu modernen Formen der Bioenergie zu fördern (Kap. 8.2). Hier kann u. a. der CDM (Kap. 10.2.3) weiterhin eine Rolle spielen. Andere Akteure der Entwicklungszusammenarbeit sind aber ebenso gefordert (Kap. 10.8).

10.7.5 Technologiepolitik zur Förderung ausgewählter Konversionspfade

Konversionstechnologien, die aus klima- und energiepolitischer Sicht besonders vorteilhaft sind (Kap. 7 und 8), leisten einen wichtigen Beitrag, um Bioenergie optimal in Energiesysteme einzubinden und zu nutzen (Kap. 8 und 9). Eine breite Anwendung dieser Technologien wird jedoch durch verschiedene Marktunvollkommenheiten behindert. Barrieren finden sich in Industrieländern, aber auch in urbanen Zentren der Schwellen- und Entwicklungsländern, für deren Energiesysteme sich zum Teil ähnliche Herausforderungen stellen, wie für die Energiesysteme in Industrieländern. Mit Hilfe staatlicher Förderungsmaßnahmen sollten daher viel versprechende Technologien für ausgewählte Konversionspfade der Bioenergie gefördert werden.

Vor allem innovative Technologien sind häufig erst nach der Realisierung von mittel- oder langfristigen Lerneffekten wettbewerbsfähig. Ihre Anwendung erscheint den Marktteilnehmern – ohne staatliche Förderung – oftmals unattraktiv. Hinzu kommt, dass gerade private Haushalte oftmals bekannte, aber weniger effiziente Technologien gewohnheitsmäßig weiter verwenden (Beharrungstendenzen). Gezielte Fördermaßnahmen können einem erwünschten Technologiewechsel Vorschub leisten. Schließlich wird der Markteintritt und die Diffusion vorteilhafter Technologien dadurch erschwert, dass in vielen Ländern und Sektoren die externen Kosten fossiler Energieträger noch immer nicht oder nur höchst unzureichend durch z. B. Steuern oder Verschmutzungszertifikate internalisiert sind. Daher erscheinen kompensatorische Fördermaßnahmen dieser Technologien erforderlich.

Die Analysen in den Kapiteln 7, 8 und 9 legen ausführlich dar, welche Vor- und Nachteile die verschiedenen Konversionspfade aufweisen. Dabei zeigt sich, dass sich mit der Verwendung nachhaltig produzierter Biomasse zur Kohleersetzung in der Stromerzeugung eine besonders hohe Klimaschutzwirkung erzielen lässt. Biogas aus Vergärungsprozessen, Rohgas aus Biomassevergasungsanlagen bzw. Biomethan sind hierbei wichtige Sekundärenergieträger (Kap. 10.7.5.1). Ebenso zeigt die direkte Verfeuerung von Hackschnitzeln oder Pellets aus Rest- und Abfallstoffen in Kohle- bzw. Heizkraftwerken eine überdurchschnittlich hohe Klimaschutzwirkung. Gas-und-Dampf-Kraftwerke und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen stellen – unabhängig von der energetischen Biomethan/Biomassenutzung – effiziente Anlagentechniken dar (Kap. 10.7.5.2). Ebenso ist es effizienter, Bioenergie im Transportsektor in der Elektromobilität einzusetzen statt durch die Substitution fossiler Treibstoffe in Verbrennungsmotoren eine ineffiziente Fahrzeugtechnologie zu verstetigen (Kap. 10.7.5.3). Auch dem Einsatz von Biomasse im Wärmebereich muss mehr Beachtung geschenkt werden (Kap 10.7.5.4). Diese Konversionspfade gilt es einerseits zu fördern, andererseits jedoch auf eine Art und Weise, die Marktentwicklungen ausreichenden Spielraum lässt, damit die Entdeckungsfunktion des Wettbewerbs möglichst wenig eingeengt wird.

10.7.5.1 Energetische Nutzung von Biomethan

Biomethan (biogenes Erdgas) kann durch Konversion von Biomasse auf zwei verschiedene Arten produziert werden: Einerseits über die Vergärung von Biomassesubstraten zu Biogas (Vergärung, Biogasanlagen), das anschließend zu Biomethan aufbereitet wird; andererseits über die Vergasung von fester Biomasse zu Rohgas, das nach Reinigung als Synthesegas in der Methanisierung zu Biomethan gewandelt wird (Vergasung, Biomassevergasungsanlagen). In beiden Fällen ist die Abtrennung des CO_2 notwendig. Biogasanlagen sind bereits heute weitläufig etabliert, mit ausgereiften Biomassevergasungsanlagen, die für eine breite Marktanwendung geeignet sind, wird hingegen frühestens ab 2015 gerechnet (Thrän et al., 2007). Auch wenn es noch etliche Jahre dauern wird, bis Biomethan z. B. in Deutschland in energiepolitisch nennenswerten Mengen zur Verfügung steht (BMU, 2008b), gehen Prognosen davon aus, dass unter bestimmten Voraussetzungen einschließ-

lich eines forcierten Ausbaus der benötigten Infrastruktur der gesamte heutige EU-Bedarf an fossilem Erdgas bis 2020 durch Biomethan gedeckt werden könnte (Thrän et al., 2007).

Im Hinblick auf die Ziele einer Energiewende zur Nachhaltigkeit weist Biomethan mehrere Vorteile auf, die im Kasten 7.2-2 und in Kapitel 9.2.1 näher erläutert werden und eine Förderung rechtfertigen. Grundsätzlich bestehen verschiedene Möglichkeiten, den Einsatz von Biomethan zu unterstützen: Es kann entweder die Erzeugung von Biomethan oder die Verwendung von Biomethan gefördert werden. Um die Förderpolitik möglichst transparent zu halten und um ihre Effektivität im Nachhinein besser abschätzen zu können, ist es sinnvoll, sich für einen der Hebel zu entscheiden. Aus Sicht des WBGU ist eine Förderung der Verwendung geeigneter, da so Biomethan nicht am Bedarf vorbei produziert wird und vor allem, weil dann die Konversionstechnologie bevorzugt werden kann, die den höchsten Beitrag zum Klimaschutz verspricht. Dies ist die Verwendung von Biomethan bei der Stromerzeugung in Ländern, in denen fossile Energieträger, insbesondere Kohle, bei der Stromgewinnung eine wesentliche Rolle spielen und durch Biomethan ersetzt würden. Folglich sollte in diesen Ländern die Förderung der Nutzung von Biomethan in der Stromerzeugung im Vordergrund stehen. Die Klimaschutzwirkung ließe sich sogar noch deutlich steigern, wenn das CO_2, das bei der Methanerzeugung ohnehin abgetrennt werden muss, anschließend sicher eingelagert würde (Carbon Capture and Storage, CCS). Somit gewinnt das Vorantreiben von CCS auch aus bioenergiepolitischer Sicht an Bedeutung.

Zugang des Biomethans ins Gasnetz

Die Verwendung von Biomethan als gasförmiger Energieträger ist in industriellen Energiesystemen auf eine ausreichende und funktionsfähige Netzinfrastruktur sowie auf einen ungehinderten Zugang der Betreiber von Biogas- bzw. Biomassevergasungsanlagen zum (überregionalen) Gasnetz und den entsprechenden Anschluss der Kraftwerke angewiesen. Erfahrungen mit der Aufbereitung von Biogas und Einspeisung in (lokale) Gasnetze wurden in der Schweiz, Schweden und den Niederlanden gemacht (FNR; 2006e; van Burgel, 2006). In Deutschland gibt es etwa ein Dutzend Biogasanlagen, die aufbereitetes Biomethan in das Erdgasnetz einspeisen, ca. 20 weitere befinden sich in Planung. Europaweit werden ca. 80 Biogasaufbereitungsanlagen betrieben (Bensmann, 2008; ISET, 2008). Die rechtlichen Grundlagen der EU ergeben sich durch die Bestimmungen für den Erdgasbinnenmarkt und den dortigen Vorgaben für einen nichtdiskriminierenden Zugang zum Gasnetz sowie den Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen in den Mitgliedsstaaten (van Burgel, 2006). In Deutschland erfolgt die Einspeiseförderung durch Regelungen zu Netzzugang, Abnahmeverpflichtung der Gasnetzbetreiber und Zahlungen für vermiedene Netzkosten, d.h. Aufteilung von Kostenersparnissen, die entstehen wenn bei der lokalen Einspeisung die Transportdistanzen zwischen Gasproduktion und –verbrauch geringer sind (Leuschner, 2008).

Im Allgemeinen wäre der Netzausbau zu fördern und es wäre zugleich allen Netzbetreibern vorzuschreiben, z. B. in Pumpstationen, die für einen Netzzugang von Biomethananlagenbetreiber erforderlich sind, zu investieren. Diese Pumpstationen heben den Gasdruck des eingespeisten Biomethans auf das Druckniveau, das zur Einspeisung und Übertragung in Ferngasnetzen notwendig ist.

Förderung der Einspeisung von Strom aus Biomethan

Die in jüngerer Zeit deutlich gestiegenen Gaspreise dürften zwar dazu beitragen, die Einspeisung dezentral erzeugten Biomethans attraktiver zu gestalten und die noch stärker angestiegenen Kohlepreise dürften Biomethan auch für Stromerzeuger interessanter machen. Da aber die Emissionen fossiler Energieträger in den meisten Ländern nicht und auch in der EU bislang nicht hinreichend mit ihren externen Kosten belastet werden (Kap. 10.7.1 und 10.7.7.3), bedarf es expliziter Anreize für die Stromerzeugung aus Biomethan. Einspeisevergütungen haben sich zur Förderung erneuerbarer Energien empirisch vergleichsweise gut bewährt (UBA, 2006a). Gleichwohl sollten Staaten durch die EU und anderweitig denkbare Verpflichtungen grundsätzlich nicht auf Einspeisevergütungen festgelegt werden, da andere Instrumente ebenfalls Vorteile haben (WBGU, 2003a; Ringel, 2004; UBA, 2006b; Finon, 2007; Umsicht, 2007). Allerdings können speziell bei Energie aus nachwachsenden Rohstoffen Quoten problematisch sein, da der Zwang, eine bestimmte Mindestmenge an Energiepflanzen oder Reststoffen zur Stromerzeugung zu nutzen, zu erheblichen Marktverzerrungen führen kann, die sich im Falle von Energiepflanzen wesentlich heftiger auf Landnutzungskonkurrenzen und besonders Nahrungsmittelpreise auswirken können als im Falle anderer erneuerbarer Energien.

In vielen Ländern wird die Stromerzeugung aus Biomasse gefördert: Zusätzlich zu einer generellen Vergütung pro kWh für die Einspeisung von Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen (z.B. Wind- und Solarenergie) ins Stromnetz wird eine ergänzende Vergütung gewährt für Elektrizität, die aus Biomasse bzw. nachwachsenden Rohstoffe (NaWaRo) erzeugt wird. In Deutschland geschieht dies durch den so genannten NaWaRo-Bonus. Dieser Bonus kann durch zusätzliche Boni für die Wär-

menutzung aus Kraft-Warme-Kopplungsanlagen (Kap. 10.7.5.2), für den Einsatz neuer Technologien, sowie die Verwendung organischer Reststoffe aufgestockt werden (FNR, 2006e). In Schweden erfolgt die Förderung der Stromerzeugung durch handelbare Zertifikate für Elektrizität aus erneuerbaren Energien (SBGF et al., 2008). Der WBGU erachtet solche Förderungen als sinnvoll, solange sichergestellt ist, dass die Bioenergieträger wenigstens dem WBGU-Mindeststandard für Nachhaltigkeit genügen und rät darüber hinaus, besondere Anreize zu erwägen, wenn die oben genannten Förderkriterien für Energiepflanzen erfüllt sind (Kap. 10.3). Angesichts des hohen Klimaschutzpotenzials und der systemtechnischen Vorteile von Biomethan bei der Stromerzeugung (Kasten 7.2-2), vor allem wenn dadurch letztlich Kohle substituiert wird, empfiehlt der WBGU außerdem zusätzliche Fördermaßnahmen für Strom aus Biomethan, wenn das beim Herstellungsprozess ohnehin abzutrennende CO_2 aufgefangen und einer sicheren Deponie zugeführt wird.

Nachhaltigkeitsanforderungen

Damit Biomethan tatsächlich einen hohen Beitrag zum Klimaschutz leistet, müssen Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus gering gehalten werden und das (bei Biomethan ohnehin) abgetrennte Kohlendioxid idealerweise eingelagert werden. Entsprechende Anforderungen wie z. B. bei Energiepflanzen (Kap. 10.7.5.2) als Biogassubstrat müssen die Förderpolitiken flankieren. Um Methanemissionen aus nicht abgedichteten Gärrestlagern oder bei der Gasverbrennung in BHKW zu reduzieren, muss die Anwendung von Best Practice-Vorschriften zur Voraussetzung für eine Förderung gemacht werden. Gleiches gilt für die Anwendung von Methoden, um Ammoniak-Emissionen aus der Gärrestlagerung und Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen gering zu halten. Im Weitern müssen bei der Verwendung von Energiepflanzen die Nachhaltigkeitsanforderungen im Bezug auf den Biodiversitätschutz berücksichtigt werden (BMU, 2008d). Ungeachtet der spezifischen Förderungspolitik sollte die Stromerzeugung aus Biomasse also nur dann gefördert werden, wenn Mindeststandards der Nachhaltigkeit eingehalten werden. Die deutsche und europäische Förderpolitik ist entsprechend auszugestalten bzw. internationale Bioenergiekooperationen sind darauf auszurichten.

10.7.5.2 Effiziente Anlagentechnik in der Strom- und Wärmerzeugung

Um das Potenzial der Bioenergie zur Transformation der Energiesysteme für mehr Energieeffizienz und Klimaschutz (Kap. 8.1.1) realisieren zu können, ist die Verbreitung und Anwendung effizienter Anlagentechniken von hoher Bedeutung.

Kraft-Wärme-Kopplung

Durch die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme in Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird der verwendete Brennstoff, sei es aus fossilen oder erneuerbaren Quellen einschließlich biogener Energieträger, technisch besonders effizient genutzt (hoher Brennstoffnutzungsgrad) (Kap. 8.1.2.3). Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, besonders viel fossilen Brennstoff zu substituieren bzw. Emissionen insgesamt einzusparen. Trotz ihrer hohen Effizienz sind KWK-Anlagen bisher in Industrieländern unzureichend etabliert. In den EU-Mitgliedsländern stellt sich die Verbreitung sehr unterschiedlich da. Faktoren für eine breite Anwendung sind ein verfügbares Fern- oder Nahwärmenetz, Zugriff auf Erdgas als der oftmals bevorzugte Brennstoff sowie dazugehörige Transportinfrastrukturen und schließlich ein hinreichender Bedarf für Wärme. Auch Markteffekte, wie steigende Brennstoffpreise und z T. sinkende Strompreise beeinträchtigen die Wettbewerbsfähigkeit von KWK-Anlagen. Förderpolitiken in den Mitgliedsstaaten werden durch die EU-Richtlinie zu KWK von 2004 unterstützt und sehen u.a. Zulagen für den Anlagenneubau, Energiesteuer-Abschläge für verwendete Energieträger, garantierte Einspeisevergütungen bei der Stromerzeugung sowie staatliche Infrastrukturinvestitionen vor (EEA, 2007b). Auch in Deutschland wird von diesem Instrumentarium Gebrauch gemacht (siehe novelliertes KWK-Gesetz). Speziell für Biogas hat vor allem die Einspeisevergütung nach dem Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG) zu einem deutlichen Ausbau von Biogas betriebenen KWK-Anlagen geführt (IEA, 2008a). Für künftige Investitionsanreize und damit für die Wettbewerbsfähigkeit von effizienten KWK-Anlagen werden vor allem die energie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen von Bedeutung sein (UBA, 2008b). In diesem Zusammenhang begrüßt der WBGU den Vorschlag der EU Kommission, die kostenlose Zertifikatszuteilung im Emissionshandelssystem (ETS) zurückzuführen. Um die hohe Effizienz von KWK im ETS anzuerkennen, sollten wie derzeit vorgesehen Freizertifikate zugeteilt bzw. Abschläge bei den Zertifikatspflichten vorgesehen werden (IEA, 2008b). In Sektoren, die nicht dem Emissionshandel unterworfen sind, sollten partielle Steuerbefreiungen fortgesetzt werden. In Ländern ohne Emissionshandel oder CO_2-Emissionsabgaben, wie in Entwicklungsländern, können Investitionszulagen oder Output-Subventionen in Abhängigkeit eines effizienten Stands der Anlagentechnik geleistet werden, um KWK zu fördern.

Gas- und Dampfkraftwerke in der Stromerzeugung

Gas- und Dampfkraftwerke (GuD-Kraftwerke) haben die höchsten Stromwandlungswirkungsgrade. Sie können außerdem Systemleistungen, wie hochwertige Regelenergie und eine variable Steuerung der Stromerzeugung erbringen, die das Stromnetz stabilisieren und die technische Versorgungssicherheit erhöhen (Kap. 8). GuD-Kraftwerke werden in der Regel großskalig gebaut. Die Vorteile dieser Anlagentechnik sind eine hocheffiziente und steuerbare Stromerzeugung sowie ihre Wirtschaftlichkeit. In Industrieländern ist das für die Kraftwerksinvestition notwendig Kapital verfügbar und es herrscht weitestgehende Investitionssicherheit. Daher bedarf es nach Auffassung des WBGU keiner besonderen Förderung dieser Technik. Das Augenmerk sollte auf ein konsistentes Emissionshandels- oder –abgabensystems gelenkt werden, wodurch wirksame Anreize für die Anwendung von effizienten und emissionsarmen Anlagentechniken, wie bei GuD-Kraftwerken, gesetzt werden. Anders ist dies in den Entwicklungsländern, die keine wirksamen Anreizmechanismen zur Emissionsvermeidung vorsehen, über wenig Kapital verfügen und in denen sich potenzielle Investoren aufgrund mangelnder Investitionssicherheit zurückhalten.

10.7.5.3 Direkte Verbrennung fester Biomasse zur Wärmerzeugung in privaten Haushalten

Die Direktverbrennung von Biomasse in Kohle- bzw. Heizkraftwerken und die Nutzung von Bio- bzw. Rohgas bei der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung wird in vielen Ländern bereits gefördert und sollte unter Beachtung von Nachhaltigkeitsstandards vor allem in Ländern mit hohem Kohleanteil in der Stromerzeugung fort- bzw. eingeführt werden. Die direkte Verbrennung von Biomasse zur Wärmebereitstellung ist hingegen nur teilweise förderungswürdig. Zwar kann die Verwendung fester Bioenergieträger, wie z.B. pelletierte Energiepflanzen oder Reststoffe, im Wärmesektor zu signifikanten Treibhausgasminderungen beitragen, indem sie Öl als fossilen Energieträger substituieren (Kap. 7.3), aber es zeigt sich, dass Bioenergie und damit auch feste Biomasse eine größere Klimaschutzwirkung in der Stromerzeugung entfaltet, wenn sie Kohle ersetzt. Nach Ansicht des WBGU kann die für Haushalte erforderliche Wärme am effizientesten in Kombination mit der Stromerzeugung in Form von Abwärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) (Kap. 10.7.5.2) sowie langfristig mit aus regenerativem Strom betriebenen Wärmepumpen unter Nutzung von Umgebungswärme erzeugt werden. Allerdings dürfte es u.a. wegen der hohen erforderlichen Infrastrukturinvestitionen besonders im ländlichen Raum relativ lange dauern, bis KWK einen großen Anteil des Wärmebedarfs deckt und noch länger, bis regenerativ betriebene Wärmepumpen die Regel sind, wobei bisher besonders die Umstellung auf eine umfängliche regenerative Stromerzeugung ein Problem darstellt. Somit kann die Nutzung von Holz-, Hackschnitzel- und Pelletheizungen eher als zweitbeste Lösung für den Übergang eingestuft werden, die vor allem dort sinnvoll ist, wo nicht mit dem Ausbau von Nah- und Fernwärmenetzen zu rechnen ist (Kap. 8.1.1.1 und 8.1.1.2).

Gerade im Bereich der privaten Haushalte und auch in öffentlichen Einrichtungen kann eine Übergangsförderung sinnvoll werden, da nicht damit gerechnet werden kann, dass eine zügige Substitution von fossilen auf biogene Brennstoffe stattfindet. Oftmals setzen Haushalte nicht die effizientesten Technologien ein, wodurch sowohl vorhandene Treibhausgasminderungspotenziale als auch wirtschaftliche Einsparpotenziale nicht ausgeschöpft werden. Gründe sind u.a. die im Wärmebereich besonders ausgeprägten Beharrungswiderstände auch gegenüber wirtschaftlich lohnenden Technologien. Hohe, aber langfristig wirtschaftliche Investitionen erscheinen Gebäudeeigentümern oft unattraktiv aufgrund von Finanzierungsproblemen sowie einer allgemeinen Minderschätzung künftiger Ersparnisse gegenüber heutigen, vor allem, wenn im Mieter-Vermieter-Verhältnis die Investitionen vordergründig dem Mieter zugute kommen (Schleich und Gruber, 2008; Levine et al., 2007). In diesem Bereich kann folglich für eine Übergangszeit von ca. 10–15 Jahren eine Förderung in Form von Subventionen sinnvoll sein, etwa verbilligte Darlehen oder andere Investitionszulagen für Haushalte und Unternehmen bei der Umstellung auf das Heizen mit Biomasse (Levine et al., 2007, BMU, 2008c). Angesichts der Beharrungsproblematik findet darüber hinaus das Ordnungsrecht Anwendung. So sind z.B. in Deutschland Gebäudeeigentümer bei Neubauten verpflichtet, den Wärmebedarf anteilig aus erneuerbaren Energien zu decken.

Bei einer derartigen Förderpolitik empfiehlt es sich, die Förderungen auf das Heizen mit Pellets zu konzentrieren. Nachteilig ist jedoch, dass bei der Anlagenförderung keine differenzierte Förderung nach Energiepflanzen oder Abfall- und Reststoffen möglich ist. Soweit die Staaten noch keine strengen Emissionsauflagen erlassen und durchgesetzt haben, sind solche parallel zur Förderung erforderlich, da die Verfeuerung andernfalls zu steigenden Schadstoff- und Feinstaubemissionen führt. Auch für Schwellen- und Entwicklungsländer sind Fördermaßnahmen einschließlich Emissionsvorschriften geeig-

net, besonders in Bezug auf wohlhabendere städtische Haushalte, wenngleich es in diesen Ländern vor allem um die Effizienzsteigerung traditioneller Biomassenutzung im ländlichen Raum und in Bezug auf ärmere Haushalte gehen muss (Kap. 10.8.2).

10.7.6 Förderung von Bioenergie in der Endnutzung

Neben der beschriebenen Förderung von Anbausystemen und Konversionstechnologien werden in der Praxis bestimmte Formen der Energieendnutzung mehr oder weniger vorgeschrieben. Vor allem mit Hilfe von Quoten wird bestimmt, dass die Energieverbraucher oder Energieanbieter einen Mindestanteil ihrer Energienutzung bzw. ihres Angebots mit biogenen Energieträgern decken müssen. Beimischungsquoten für Kraftstoffe sind das klassische Beispiel, das in vielen Industrie- und Schwellenländern zur Anwendung kommt (Kap. 4.1.2). So soll z.B. in Deutschland laut Gesetzentwurf über Beimischungsquoten für Diesel und Ottokraftstoffe erreicht werden, dass Biokraftstoffe 2009 5,25 % und ab 2010 6,25 % am Energiegehalt des gesamten Kraftstoffverbrauchs ausmachen (BMU, 2008f). Ausgangspunkt hierfür ist vor allem das von der EU geplante Ziel, bis 2020 einen Anteil von 10 % Biokraftstoffen am Kraftstoffverbrauch zu erreichen (EU-Kommission 2008a), wobei aktuell diskutiert wird, eher Verpflichtungen in Richtung eines 10 %igen Anteils erneuerbarer Energien am Energieverbrauch im Straßenverkehr zu fordern. Gemäß Forderungen des Europäischen Parlaments sollten dann 40 % aus anderen Energiequellen als flüssige Biokraftstoffe der ersten Generation kommen sollen (z.B. Nutzung von Wasserstoff oder Elektrizität für die Automobilität oder Biokraftstoffe der zweiten Generation aus Reststoffen) (EU-Parlament, 2008; Kasten 4.1-3). Demgegenüber gibt es „weiche“ Zielquoten im Sinne von Ausbauzielen, die sich nationale Regierungen setzen. Solche Zielquoten sind z.B. im Bereich der Biomethannutzung definiert (Kap. 10.7.5.1). So verfolgt die Bundesregierung mit der Förderung der Netzeinspeisung von Biomethan das Ziel, bis 2020 jährlich 6 Mrd. m^3 Biomethan und bis 2030 jährlich 10 Mrd. m^3 Biomethan in das deutsche Erdgasnetz einzuspeisen. Letztere entsprechen etwa 10 % des heutigen nationalen Erdgasverbrauchs. Derartige bioenergie-spezifischen Ausbauziele der Politik setzen Signale für die Marktakteure, ohne dass diese durch starre Verwendungsquoten in ihren (Investitions-)Entscheidungen direkt eingeschränkt werden. Darüber hinaus wird der Bioenergieeinsatz durch allgemeine Ausbauziele für erneuerbare Energien beeinflusst, die in vielen Ländern verabschiedet oder geplant sind. Zum Beispiel gibt es in der EU Pläne, bis 2020 20 % des Endenergieverbrauchs in der EU durch erneuerbare Energien zu decken (EU-Kommission, 2008a; Kasten 4.1-3) Solche Ausbauziele sehen eine größere Flexibilität in der Auswahl der erneuerbaren Energieform vor und erlauben so eher effiziente Investitionsentscheidungen als enge sektorspezifische Bioenergieverwendungsquoten wie bei Kraftstoffen (Egenhofer, 2007).

Derartige starre Quoten führen nicht nur zu einer engeren Investitionslenkung, sie induzieren auch eine dauerhafte hohe Nachfrage nach biogenen Energieträgern durch die Marktteilnehmer, ohne dass die relativen Knappheiten auf den Biomassemärkten sowie die Verstärkung von Landnutzungskonkurrenzen hinreichend berücksichtigt werden. Zusätzliche Ineffizienzen entstehen, indem die Verwendung der Bioenergie – nämlich Wandlung in einen flüssigen Biokraftstoff und seine Verwendung in Kraftfahrzeugen – gesetzlich vorgeschrieben wird, unabhängig davon, dass andere Bioenergie-Nutzungspfade wirtschaftlicher sein und Treibhausgasemissionen zu geringeren Kosten vermieden werden können (Kap. 7). Schließlich fördert eine Beimischungsquote technologische lock-in-Effekte im Kraftfahrzeugbereich, da durch diese Förderung u.a. Infrastrukturen für die weniger effizienten Verbrennungsmotoren verstetigt werden mit der Konsequenz, dass sich Barrieren verfestigen, die einen mittelfristig angezeigten Umstieg auf die Elektromobilität verzögern. Alles in allem illustriert dieses Beispiel, wie politisch vergleichsweise starre und eingriffsintensive Vorgaben unbeabsichtigterweise zu umwelt- und klimapolitisch wenig effektiven Ergebnissen führen, Ineffizienzen begünstigen und unerwünschte Fernwirkungen, etwa auf die Nahrungsmittelpreise, herbeiführen können (Kulessa, 2007).

Aus den genannten Gründen lässt sich nach Ansicht des WBGU unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten die Förderung flüssiger Biokraftstoffe für den Verkehr in Industrieländern nicht rechtfertigen. Der WBGU empfiehlt deshalb den raschen Ausstieg aus der Förderung von Biokraftstoffen in Industrieländern. Insbesondere in den EU-Staaten sollten derzeitige Beimischungsquoten nicht weiter erhöht und innerhalb der nächsten drei bis vier Jahre ganz zurückgenommen werden. In der EU sollte dies jedoch nicht dazu führen, dass die Automobilwirtschaft aus ihrer Pflicht zum Klimaschutz entlassen wird. Bei einem Wegfall der Beimischungsquoten müssen die vereinbarten spezifischen Emissionsminderungen auf anderen Wegen erreicht werden.

Die Produktion und Nutzung von flüssigen Biokraftstoffen lässt sich in Entwicklungsländern angesichts der großen Armut der ländlichen Bevölkerung, der weit verbreiteten Energiearmut, deutlich schlech-

teren Ausgangsbedingungen für den raschen Übergang zur Elektromobilität und der teils chronischen Devisenknappheit besser begründen als in Industrieländern. In einigen Entwicklungs- und Schwellenländern lässt sich daher unter bestimmten Voraussetzungen der Ausbau der Biokraftstoffproduktion für den regionalen Verbrauch für eine Übergangszeit rechtfertigen, wenngleich auch hier Subventionen aus Effizienz-, Umwelt- und sozialen Aspekten kritisch zu sehen sind.

Förderung von Elektromobilität anstelle von Biokraftstoffquoten

Die Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs ist als Baustein im Gesamtkonzept von reformierten Energiesystemen zu sehen (Kap. 8.2 und 8.3). Da derzeit viele Staaten jedoch auf flüssige Biokraftstoffe setzen, um die Abhängigkeit von Erdöl oder verkehrsbedingte Treibhausgasemissionen zu mindern, besteht ein mittelbarer Zusammenhang zwischen Förderung der Elektromobilität und Bioenergiepolitik. Würden flächendeckend Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren durch sog. Plug-in-Hybridfahrzeuge oder batteriebetriebene Elektrofahrzeuge ersetzt werden, dann würde die Nachfrage nach Biokraftstoffen aus Energiepflanzen sinken und das Bioenergiepotenzial ließe sich effizienter und flexibler nutzen. Dafür ist es entscheidend, die Voraussetzungen für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen deutlich zu verbessern: Gegenwärtig haben Plug-in-Hybridfahrzeuge, die beide Antriebsarten Verbrennungs- und Elektromotor in sich vereinen, sehr geringe Marktanteile und werden fast nur in Industriestaaten gefahren. Sowohl Plug-in-Hybrid- als auch reine Elektrofahrzeuge können – ans Netz angeschlossen – auch einen Energiespeicher darstellen, der Ausgleichsenergie für die Stabilisierung der elektrischen Netze zur Verfügung stellen kann. Beide Technologien stehen bislang jedoch noch im Stadium von innerstädtischen Demonstrationsprojekten. Für die Klimabilanz von Elektromobilität ist vor allem die Zusammensetzung der verwendeten elektrische Energie nach Energiequellen von Bedeutung: Elektromobilität kann dann einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz leisten, wenn die verwendete elektrische Energie nicht vorrangig aus fossilen Energien erzeugt wird, sondern aus regenerativen Energien (Kap. 8.1; WI-IFEU, 2007). Ebenso ist die Ökobilanz der Batterien relevant (BMU, 2008a).

Eine aktive Förderung der Elektromobilität von Seiten des Staates kann durch bislang nicht realisierte Lerneffekte in der Entwicklung der Batterie- und Fahrzeugtechnologie begründet werden. In Deutschland fördert z.B. die Bundesregierung ein Industriekonsortium bei der Verbesserung von Lithium-Ionen Batterien. Zwar kann der kostenintensive Aufbau der Anschlussmöglichkeiten für die „Plug-in Hybrid“-Technologie und reine Elektrofahrzeuge an das Stromnetz die Marktentwicklung dieser Technologien beschränken, aber der Aufwand ist viel geringer einzuschätzen als bei anderen Zukunftsoptionen wie etwa der Wasserstoffwirtschaft, da die Grundstruktur der Energieversorgung, das elektrische Netz, bereits vorhanden ist. In verschiedenen Industrieländern führt die Automobilindustrie, zum Teil in Kooperation mit Energieunternehmen, seit längerem Flottenversuche zur Elektromobilität in Ballungszentren durch (Haines und Skinner, 2005) – häufig unter staatlicher Mitwirkung. Auch die Bundesregierung beabsichtigt derzeit, einen Flottenversuch eines deutschen Industriekonsortiums zur „Plug-In Hybrid“ finanziell zu fördern. In der Anschubphase können Infrastruktursubventionen die Verbreitung von Elektrofahrzeugen spürbar erleichtern. Die Nachfrage nach Elektro- bzw. Hybridfahrzeugen lässt sich darüber hinaus steuerlich anregen, insbesondere durch unterschiedlich hohe Abgaben auf fossile Brennstoffe gegenüber Strom, aber auch Vergünstigungen bei der Kfz-Steuer oder Mautgebühren. Darüber hinaus schaffen nationale Entwicklungspläne zur Elektromobilität, wie von der Bundesregierung angekündigt, Transparenz und Planungssicherheit für Wirtschaft und Verbraucher (BMU, 2008b)

Gerade in Entwicklungs- und Schwellenländern bedarf es angesichts der geringen Kaufkraft jedoch erheblicher Preissenkungen, um Elektro-PKWs zum Durchbruch zu verhelfen. Da in diesen Ländern die Mittel für ausreichende Preissubventionen fehlen, ist neben Pilotprojekten vor allem eine rasche Verbreitung der Technologien in Industrieländern wichtig, damit im Zuge von Lern- und Skaleneffekten Elektro- bzw. Hybridfahrzeuge mittel- bis langfristig in Entwicklungs- und Schwellenländern zu erschwinglichen Preisen angeboten werden können.

10.7.7 Internationale Initiativen und Institutionen zur Förderung nachhaltiger Bioenergie

Eine globale Energiewende erfordert den nachhaltigen Ausbau erneuerbarer Energien weltweit, einschließlich der Bioenergie (Kap. 2; WBGU, 2003a). Zwar gibt es ein breites, sehr vielschichtiges Spektrum von internationalen Institutionen zur Förderung erneuerbarer Energien, das von Partnerschaften und Netzwerken wie z.B. die Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership (REEEP) oder Renewable Energy Policy Network (REN21) auf der einen Seite bis hin zu UN Organisationen wie UNEP und UNDP, die einzelne Förderaspekte als Teil ihrer Aufgaben sehen (Pfahl et al., 2005; WBGU, 2004b).

Jedoch konnten die vorhandenen Institutionen bislang kein koordiniertes Vorgehen zur Förderung von erneuerbaren Energien durch Politikberatung und Technologietransfer aus einer Hand leisten.

10.7.7.1 Internationale Agentur für Erneuerbare Energien (IRENA)

Um diesen Mangel zu beheben, gab es zuletzt – auf maßgebliche Initiative der Bundesregierung hin – Bestrebungen, eine eigenständige internationale Organisation neu zu gründen, die diese Funktionen effektiv wahrnimmt. Zum Jahresende 2008 soll der Gründungsprozess für eine International Renewable Energy Agency (IRENA) abgeschlossen sein, die ab 2009 ihre Arbeit aufnehmen wird. Die so spezialisierte Agentur wird zunächst von einer größeren Gruppe von Industrie- und Entwicklungsländern getragen. Weiteren Staaten steht die Mitgliedschaft offen (FES, 2007). In ihrer Funktion als „Kompetenzzentrum" entfaltet die IRENA ihre Vorteile dadurch, dass Leistungen für Regierungen, wie Politikberatung, Technologietransfer und Kompetenzaufbau, aufgrund der Koordination gezielter und kosteneffizienter durchgeführt werden können, d.h. die Transparenz wird erhöht, Abstimmungen verbessert und Doppelförderungen vermieden (IRENA, 2008; Pfahl et al., 2005).

Eine Bündelung und Stärkung internationaler energiepolitischer Institutionen durch eine neu gegründete Organisation entspricht den Vorstellungen des WBGU. Das vom WBGU (2003a) entwickelte Modell einer Internationalen Agentur für nachhaltige Energie (ISEA) betont jedoch, dass neben der Förderung erneuerbarer Energien die Energiesysteme in ihrer Gesamtheit in den Prozess einbezogen werden müssen. Auch die Energienachfrage sowie spezielle Bedürfnisse von Entwicklungsländern müssen berücksichtigt werden. Die IRENA sollte insgesamt in die Lage versetzt werden, Energie-, Umwelt- und Entwicklungsfragen integriert zu bearbeiten. Idealerweise sollte sie eine Rolle in der Einberufung und Durchführung der vom WBGU vorgeschlagenen International Conference on Sustainable Bioenergy einnehmen. Die Ergebnisse der Konferenz sollten wiederum in die Beratungs- und Transferleistungen der IRENA zur Bioenergie eingehen. Die beschriebenen Energie-Entwicklungspfade (Kap. 8) und Fördergrundsätze für eine nachhaltige Bioenergie (Kap. 10.7.3–10.7.5) bieten eine gute Orientierungshilfe für Bioenergie-spezifische Beratungs- und Förderleistungen.

10.7.7.2 International Conference on Sustainable Bioenergy

Die aktuellen nationalen Förderpolitiken zur energetischen Nutzung von Biomasse in den Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern (Kap. 4.1.2) demonstrieren das wachsende Interesse an Bioenergie. Hinzu kommen Sondierungsprozesse und Projekte, die durch Partnerschaften wie GBEP, Netzwerke und internationale Organisationen, wie der FAO oder der IEA initiiert wurden. Diesen Politikmaßnahmen und Prozessen zur Förderung der Bioenergie liegen unterschiedliche, zum Teil offensichtlich unvollständige Einschätzungen über die Chancen und Risiken der Bioenergie zugrunde. In der Konsequenz gibt es bisher keinen hinreichenden globalen Konsens über angemessene Normen bezüglich der Produktion und der Nutzung unterschiedlicher Formen der Bioenergie. Angesichts zunehmender Biomassehandelsströme und wachsenden Ansprüchen an die Landnutzung scheint es unabdingbar, die internationale Aufmerksamkeit für die Wechselwirkungen zwischen Bioenergie und nachhaltiger Entwicklung zu schärfen sowie auf eine Konsensbildung unter den Akteuren hinzuarbeiten.

Zu diesem Zweck könnte nach dem Vorbild der renewables 2004 eine International Conference on Sustainable Bioenergy (ICSB) initiiert werden, die als Forum für einen länder- und sektorübergreifenden Dialog und eine mögliche Zusammenarbeit der beteiligten Akteure in der Agrar-, Energie- und Entwicklungspolitik dient. Sie sollte Raum für den Informationsaustausch über u.a. Beste Anwendungen (best practices) und für die Verabschiedung von Empfehlungen zu Zielen der Bioenergienutzung bieten. Konkret könnten z.B. Impulse für Vereinbarungen zu Fördermaßnahmen (z.B. Subventionen) und Wettbewerbs- und Nachhaltigkeitsanforderungen erörtert werden. Des Weiteren könnte ein Aktionsprogramm, in dem Regierungen ihre freiwilligen Maßnahmen auf nationaler oder internationaler Ebene einstellen, sowie (Rahmen-)Vereinbarungen über (bilaterale) *Partnerschaften* zu Bioenergietechnologien Teil der Konferenz sein (Kap, 9.8; WBGU, 2003a, 2004b; Pfahl et al., 2005). Gegebenenfalls könnte die Konferenz den Ausgangspunkt eines längerfristigen Folgeprozesses zur nachhaltigen Bioenergienutzung bilden. Angesichts der Dynamik der Bioenergienutzung und des enormen Handlungsdruck sollte eine teilnehmerstarke ICSB in jedem Fall zeitnah einberufen werden. Ein Engagement der Bundesregierung in diese Richtung wäre zu begrüßen.

10.7.7.3 Multilaterales Energiesubventionsabkommen (MESA)

Die Subventionierung unterschiedlicher Energieformen ist Teil der nationalen Energiestrategien, die eine adäquate und sichere Energieversorgung zu angemessenen Preisen anstreben und gleichzeitig umwelt- und klimaschädigende Effekte vermeiden sollen (IEA, 2006b). Eine genaue quantitative Ermittlung der weltweiten Energiesubventionen ist aufgrund unterschiedlicher Abgrenzungen und Berechnungsmethodiken schwierig. Verschiedene Schätzungen gehen von Subventionen in Höhe von 240 bis über 300 Mrd. US-$ aus. Es dominiert die Subventionierung fossiler Energieträger gegenüber erneuerbaren Energien und der Kernenergie (IEA, 2006b; Morgan, 2007). Bioenergie-spezifisch werden in den Industrieländern relativ hohe Subventionen zu Gunsten von Produzenten von Biokraftstoffen geleistet. Nach Steenblik (zitiert in OECD, 2008) betrug die staatliche Förderung hierfür in 2006 in den USA, der EU und Australien zusammen 11 Mrd. US-$ (Kap. 4.1.2).

Angesichts der klimapolitischen Herausforderungen und der sich abzeichnenden Wirtschaftlichkeit verschiedener erneuerbarer Energien ist es wenig effektiv, wenn nach wie vor der Großteil der Energiesubventionen im Bereich fossiler Energien geleistet wird. Der WBGU hat an anderer Stelle bereits auf die Notwendigkeit hingewiesen, Energiesubventionen weltweit umzuschichten bzw. abzubauen (WBGU, 2003a). In Bezug auf die Förderung nachhaltiger Bioenergie gilt, dass eine Förderung der fossilen Energien erwünschte Bioenergie-Nutzungspfade konterkarieren könnte, oder eben zusätzliche Fördermittel erforderlich machen könnte, um den Subventionsvorteil fossiler Energieträger zu kompensieren. Um dies zu verhindern, sollten Subventionen für fossile Energien, aber auch etwa für nicht nachhaltige Nutzungspfade der Agrarenergie (Kap. 10.7.3) abgebaut werden. Um Verzerrungen durch internationale Subventionsunterschiede zu vermeiden, empfiehlt der WBGU, ein Multilaterales Energiesubventionsabkommen (MESA) anzustoßen, das den Abbau umweltschädlicher Energiesubventionen vorsieht und global gültige Subventionsprinzipien aufstellt. Es sollte den schrittweisen Abbau der Subventionen für fossile und nukleare Energien sowie die Subventionierung erneuerbarer Energien und effizienter Energietechnologien regeln. Um die Realisierungschancen zu erhöhen, könnte ein solches Abkommen zunächst möglicherweise plurilateral ausgerichtet sein, indem vor allem die wichtigsten Energieerzeuger und -verbraucher, z.B. die Ölstaaten, und Russland sowie OECD-Länder und die Schwellenländer eingebunden werden. Langfristig könnte ein multilateraler Rahmen und eine Ansiedlung im WTO-Regelwerk angestrebt werden (WBGU, 2003a).

10.7.8 Fazit

Förderpolitiken im Bereich der Bioenergie – sei es der Anbau von Energiepflanzen oder die Erzeugung und Nutzung – müssen behutsam eingesetzt werden, damit die unzweifelhaft vorhandenen Chancen der Bioenergie für ein nachhaltiges Energiesystem besser genutzt, aber zugleich die erheblichen Gefahren eines Ausbaus vermieden werden. Dies bedeutet, dass idealerweise nur Energieträger zum Einsatz kommen sollten, die dem WBGU-Mindeststandard der Nachhaltigkeit genügen. Der erste unabdingbare Schritt besteht indes darin, zumindest jegliche Förderung von Bioenergie – sei es Anbau oder Nutzung – einzustellen, die dem Mindeststandard widerspricht. Damit sich innerhalb dieses Rahmens die Nutzungspfade durchsetzen, die unter Klima- und Umweltgesichtspunkten am vorteilhaftesten sind, muss die Klima- und Umweltpolitik so ausgerichtet sein, dass alle Emissionen erfasst und zugerechnet und externe Kosten möglichst umfassend internalisiert sind. Da dieser Zustand sowohl global als auch in einzelnen Ländern bei weitem nicht erreicht ist, erscheint eine zusätzliche Förderung der Bioenergie gerechtfertigt. Als weitere Begründungen kommen entwicklungspolitische Aspekte wie die Beseitigung von Energiearmut, Markteinführungsschwierigkeiten aufgrund von Beharrungswiderständen bei der Anwendung neuer Technologien und perspektivisch Lernkurveneffekte hinzu ebenso wie positive externe Effekte etwa beim Anbau mehrjähriger Energiepflanzen auf degradierten Flächen. Grundsätzlich sind schlanke Förderpolitiken zu bevorzugen, das heißt zum einen, dass an möglichst wenig, dafür aber großen Hebeln angesetzt wird, und dass zum anderen Instrumente mit möglichst geringer Eingriffsintensität gewählt werden. Die Förderung der Einspeisung von Biomethan ohne Verwendungsauflagen ist ein Beispiel, die Abschaffung von verbindlichen Beimischungsquoten für Kraftstoffe ein anderes. Auf internationaler Ebene spricht dieser Ansatz zum einen für vielfältige Technologiekooperationen und zum anderen für einen koordinierten Abbau von Energiesubventionen einschließlich zumindest derjenigen Bioenergiesubventionen, die nicht nachhaltige Entwicklungen befördern.

10.8 Bioenergie und Entwicklungszusammenarbeit

Viele Entwicklungsländer setzen große Hoffnungen in einen internationalen Bioenergieboom. Tatsächlich bieten Produktion und Nutzung moderner Bioenergie Entwicklungsländern eine Reihe von Chancen. Daneben birgt die Bioenergie aber auch gewichtige Risiken, die angesichts der hohen und von einer anfänglich weltweiten Bioenergieeuphorie geschürten Erwartungen, leicht übersehen werden. Diese werden vor allem in der Produktion von Biokraftstoffen für den überregionalen Bedarf und die Exportwirtschaft sichtbar, wo kurzsichtige Investitionen neue Abhängigkeiten schaffen können und die für eine nachhaltige Entwicklung notwendigen Voraussetzungen nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden (Kap. 8; Kasten 8.2.3). Der Fokus der aktuellen Diskussion auf flüssige Biokraftstoffe für den Verkehrssektor verstellt außerdem den Blick auf die Gesamtpotenziale der energetischen Nutzung von Biomasse in Entwicklungsländern, z.B. durch Effizienzsteigerung der traditionellen Biomassenutzung und der Nutzung von Bioenergie zur Strom- und Wärmeerzeugung. Aus entwicklungspolitischer Perspektive sind daher die Chancen und Risiken der Bioenergie und insbesondere der großskaligen Produktion von Energiepflanzen vor dem Hintergrund unterschiedlicher länderspezifischer Vorraussetzungen und energetischer Bedürfnisse von Entwicklungs- und Schwellenländern sorgsam abzuwägen und mit geeigneten Förderstrategien in der Entwicklungszusammenarbeit abzustimmen.

Um die mit Bioenergie verknüpften Chancen realisieren zu können und negative Auswirkungen, wie insbesondere eine Gefährdung der Ernährungssicherheit durch die Umwandlung von Ackerflächen und die steigende Abhängigkeit der Nahrungsmittel- von den Energiepreisen, zu vermeiden, ist ein hohes Maß an staatlicher Steuerungs- und Regulierungskompetenz erforderlich, das weit über den Bereich der engeren Bioenergiepolitik hinausweist (Kap. 10.2–10.6). Auf nationaler Ebene sind funktionsfähige staatliche Strukturen, gute Regierungsführung, eine partizipative Landnutzungsplanung und gerechte Landverteilungsmechanismen sowie die Gewährleistung der Ernährungssicherheit Voraussetzungen für eine entwicklungswirksame Bioenergiepolitik. In vielen Entwicklungsländern sind diese Voraussetzungen nicht gegeben. Wo dies aber der Fall ist oder absehbar geeignete Voraussetzungen geschaffen werden können, bestehen durchaus Potenziale zum nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen (Kap. 6.7). In diesem Sinne sind länderspezifische Bioenergiestrategien zu entwickeln, die sicherstellen, dass Entwicklungspotenziale so ausgeschöpft werden können, dass die mit der Bioenergieproduktion verbundenen Risiken vermieden oder zumindest deutlich verringert und ihre Chancen zur Überwindung der Energiearmut nachhaltig genutzt werden.

Für die globale Entwicklungspolitik und ihre multilateralen und bilateralen Akteure ist Bioenergie kein grundsätzlich neues Thema. So werden die traditionelle Nutzung von Bioenergie und Effizienzverbesserungen in diesem Bereich schon seit Jahren als Element zur Überwindung von Energiearmut diskutiert. Teilweise wird dies auch in Programmen zur Förderung erneuerbarer Energien berücksichtigt, zumeist jedoch mit geringer Priorität. Biokraftstoffen wird hingegen in der aktuellen Diskussion große Bedeutung beigemessen, wobei es erkennbar noch an klar definierten Positionen und kohärenten operativen Strategien mangelt. Dies gilt nicht zuletzt für eine sektorübergreifende Abstimmung der internationalen Zusammenarbeit in den Bereichen Bioenergie, Ernährungssicherung, ländliche Entwicklung und Klimaschutz. Stattdessen wurde eine Vielzahl von Initiativen und Politikprozessen angestoßen, die ein von Unsicherheit geprägtes und zum Teil widersprüchliches Bild ergeben, wie der nachfolgende Überblick über die einschlägigen internationalen Institutionen und Akteure verdeutlicht (Kap. 10.8.1).

Der WBGU stellt diesem Panorama der internationalen Entwicklungszusammenarbeit im Bioenergiesektor die nach seiner Auffassung zentralen Elemente nachhaltiger Bioenergiestrategien für Entwicklungsländer gegenüber (Kap. 10.8.2) und leitet daraus Schlussfolgerungen für eine aktive Förderpolitik ab (Kap. 10.8.3). Damit blickt der WBGU über die auf Biokraftstoffe verengte internationale Debatte hinaus und betont die je nach Nutzungspfad unterschiedliche Eignung von Bioenergie zur klimafreundlichen Bekämpfung der Energiearmut durch die Bereitstellung von Strom, Wärme und Mobilität.

10.8.1 Aktuelle Bioenergieaktivitäten in der internationalen Entwicklungszusammenarbeit

Eine kohärente und nachhaltige globale Bioenergiepolitik bedarf einer intelligenten Verknüpfung der internationalen Energiepolitik mit anderen Politikbereichen – insbesondere der internationalen Agrar-, Umwelt- und Handelspolitik – über unterschiedliche Handlungsebenen hinweg. Dies erfordert eine effektive und gut koordinierte institutionelle Architektur, wie sie bislang bestenfalls in Ansätzen existiert. Nachfolgend werden die Aktivitäten der aus entwicklungspolitischer Perspektive wichtigsten multi-

lateralen Akteure skizziert und mit einem Blick auf die spezifischen Beiträge der europäischen und deutschen Entwicklungszusammenarbeit ergänzt.

10.8.1.1 Weltbankgruppe und Regionale Entwicklungsbanken

Die Weltbankgruppe

Die Förderung von Bioenergie ist ein Teilbereich der Projekte und Programme der Weltbank (IBRD und IDA) im Bereich erneuerbarer Energien und Energieeffizienz. Einen weit größeren Anteil haben die Förderung von Solarenergie, Wind- und Wasserkraft sowie die Effizienzerhöhung bei der Nutzung konventioneller Energieformen (IBRD, 2007). Konkret gefördert wird Bioenergie bislang nur in kleinskaligen Projekten, die der Bekämpfung von Energiearmut in Entwicklungsländern dienen (z.B. Burkina Faso Energy Access Project für nachhaltiges Brennholzmanagement). Ein weiteres aktuelles Beispiel ist die zusätzliche Finanzierung von 35 Mio. US-$ zur Unterstützung des Household Energy and Universal Access (HEURA) Projekts in Mali, das sowohl zum Aufbau von Kapazitäten, dem Ausbau der ländlichen Elektrifizierung sowie zum kommunalen Waldmanagement und zu Energieeffizienzinitiativen bei der Nutzung von Haushaltsenergie beiträgt (World Bank, 2008a, b). Hier sollte geprüft werden, welchen Beitrag das Projekt bezüglich einer Bioenergiekomponente eines nachhaltigen nationalen Energiesystems in Mali leisten kann. Im Geschäftsjahr 2008 hat sich die Finanzierung der Weltbank für erneuerbare Energien und Energieeffizienz, teilweise kofinanziert durch die GEF, insgesamt gegenüber dem Vorjahr fast verdoppelt. Es wurden insgesamt 1,4 Mrd. US-$ ausgegeben, davon 476 Mio. US-$ für Projekte im Bereich erneuerbarer Energien (Zabarenko, 2008).

Die Weltbankgruppe verhält sich bei den Biokraftstoffen aufgrund der aktuellen Debatte im Hinblick auf Umweltverträglichkeit, Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion und die damit verbundenen Unsicherheiten eher zurückhaltend (World Bank, 2008e). Die Strategiefindung der Weltbank bezüglich der Förderung von Bioenergie ist noch nicht abgeschlossen. Diese Unsicherheit spiegelt sich im Development Committee (ein gemeinsamer Ministerausschuss von Weltbank und IWF) wider: Während z.B. Indien die Verschiebung der Agrarproduktion von Nahrungsmitteln hin zu Biokraftstoffen scharf kritisiert („bad policy and worse economics"), betrachtet Brasilien Biokraftstoffe als große Entwicklungschance und Bundesministerin Wiezoreck-Zeul forderte als deutsches Mitglied im Development Committee von Weltbank und IWF ein Moratorium auf die Beimischung von Biokraftstoffen, bis die Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion besser analysiert sind. Einigkeit besteht darin, die spezifische Rolle von Biokraftstoffen in Entwicklungsprozessen kritisch zu prüfen. Dazu will die Weltbank verstärkt in Forschung investieren (Siegel, 2008).

Die Internationale Finanzkorporation (IFC), die als Teil der Weltbankgruppe besonders mit dem privaten Sektor in Entwicklungsländern zusammenarbeitet, ist in zahlreiche Biokraftstoffprojekte involviert. Über Anzahl und Volumen lassen sich gegenwärtig keine genauen Aussagen treffen, da die agrarwirtschaftlichen Projekte bislang nur als Ganzes und nicht nach Systemkomponenten getrennt erfasst werden. Eine solche Aufschlüsselung sollte dringend vorgenommen werden, um die Entwicklung im Biokraftstoffsektor besser beobachten und beurteilen zu können. Trotz ernst zu nehmender Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion sieht die IFC grundsätzlich positive Effekte für den Landwirtschaftssektor. Insbesondere wird erwartet, dass durch den Anbau von Energiepflanzen lokale landwirtschaftliche Praktiken verbessert werden, zusätzliche Infrastruktur aufgebaut wird, sich die Einkommen der Landwirte erhöhen und Forschung und Entwicklung bezüglich neuer Züchtungen und Praktiken vorangetrieben wird. Allerdings konstatiert auch die IFC, dass Zusammenhänge und das Ausmaß der Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion noch nicht hinreichend verstanden seien. Die IFC vertritt hierzu den Standpunkt, besser gestaltend in die Entwicklung des Biokraftstoffsektors einzuwirken, als ihn aufgrund der bestehenden Risiken vollständig zu meiden und damit auf Einfluss zu verzichten. Dies gilt insbesondere für Ethanol aus Zuckerrohr, dessen Produktion bereits global wettbewerbsfähig ist, und für Projekte, die Biodiesel aus Rohstoffen mit niedrigem Wertschöpfungsanteil (z.B. Altöl und tierische Fette) generieren. Neben den generellen IFC-Safeguards, die ökologische und soziale Projektstandards spezifizieren, werden für Biokraftstoffe keine weiteren Standards verlangt. Weiteren Forschungsbedarf sieht die IFC vor allem bezüglich der Produktion von Biodiesel aus *Jatropha* und anderen Energiepflanzen, die nicht direkt mit der Nahrungsmittelproduktion konkurrieren (Hamad, persönliche Mitteilung, 2008).

Die Weltbankgruppe sollte dringend eine umfassende Strategie entwickeln, wie sie zu einem Umbau des Weltenergiesystems beitragen kann. Dabei sollte insbesondere auch auf die Rolle von Technologien, die Treibhausgasemissionen vermeiden, einschließlich der Bioenergienutzung eingegangen werden.

Die Regionalen Entwicklungsbanken AfDB, ADB und IADB

Die Afrikanische Entwicklungsbank (AfDB) überarbeitet gegenwärtig ihre energiepolitische Strategie von 1994. Ihre Strategieentwicklung hinsichtlich des Bioenergiesektors steht dabei noch am Anfang. Es ist zu erwarten, dass Überlegungen zu nachhaltigem Energiemanagement und zum Klimaschutz in die Energiestrategie der AfDB einfließen und in diesem Zusammenhang Minimalziele für Kredite und Zuschüsse festgelegt werden (AfDB, 2007). Grundsätzlich werden für den Anbau von Energiepflanzen in Afrika große Potenziale gesehen, die zu realisieren allerdings angesichts des niedrigen Entwicklungsstands der Region mit großen Herausforderungen verbunden ist. Fragen der Verfügbarkeit von geeigneten Technologien, Infrastruktur und Logistik, Marktnachfrage und Handel sind dabei ebenso schwierig zu beantworten, wie die nach der Nutzungskonkurrenz zwischen Nahrungsmittelproduktion und Biokraftstoffproduktion oder nach den spezifischen Potenzialen für die ländliche Bevölkerung sowie kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU; Sanchez Blanco, 2008). Auf dem nächsten Partnerschaftstreffen zur ländlichen Entwicklung in West- und Zentralafrika, an dem im Oktober 2008 neben der AfDB auch Weltbank, FAO und IFAD beteiligt sind, sollen die Konsequenzen der Biokraftstoffproduktion für das regionale Energie- vs. Nahrungsangebot eingehend erörtert werden. Die AfDB denkt aktuell über die Förderung kleinskaliger Biogasprojekte nach dem Vorbild asiatischer Projekte nach (AfDB, 2007).

Ein Strategiepapier der Asiatischen Entwicklungsbank (ADB) zum Klimawandel äußert sich in Bezug auf den potenziellen Beitrag von Biokraftstoffen sehr vorsichtig: Biokraftstoffe könnten nur dann zu einer Reduktion von Treibhausgasen gegenüber konventionellen Kraftstoffen führen, wenn die Rohstoffe und Betriebsmittel dafür sorgfältig ausgewählt werden und der Einsatz fossiler Kraftstoffe in der Produktion minimiert wird. Ebenso müssten Ernährungssicherheit und andere Belange ärmerer Länder bei der Produktion von Biokraftstoffen explizit berücksichtigt werden. Die ADB will diese Nutzungskonflikte sorgfältig analysieren und nur solche Projekte fördern, die nicht zur Landdegradation, zu Monokulturen oder zu Preisschocks für Pflanzenöle führen. Laut ADB kommen demnach *Jatropha*, Zuckerhirse und Bagasse (Zuckerrohrrückstände) sowie Biokraftstoffe der zweiten Generation (ADB, 2007a, b) möglicherweise für eine Förderung der Biokraftstoffproduktion in Frage. Ein Schwerpunkt der ADB liegt in Projekten zur Bekämpfung der Energiearmut. Im Mekongdelta werden beispielsweise Bioenergieprojekte finanziert, in denen aus landwirtschaftlichen Reststoffen Biogas hergestellt und für ländliche Haushalte als Wärmeenergie nutzbar gemacht wird (ADB, 2007b). Zu den als erfolgreich eingeschätzten größeren Projekten zählt auch das Efficient Utilization of Agricultural Wastes Project in China. Hier wurden, kofinanziert durch die Globale Umweltfazilität (GEF), 33,1 Mio. US-$ in Kleinbiogasanlagen investiert und damit Einkommen und Lebensstandard von 18.540 Haushalten erhöht (ADB, 2008b).

Die Inter-Amerikanische Entwicklungsbank (IADB) ist Biokraftstoffen gegenüber deutlich optimistischer eingestellt als Weltbank oder Asiatische Entwicklungsbank. Das ist darauf zurückzuführen, dass 40 % der globalen Bioethanolproduktion aus Lateinamerika stammen und auch der lateinamerikanische Biodieselmarkt gegenwärtig stark expandiert. So ist die IADB beispielsweise Partner des „US-Brazil Memorandum of Understanding to advance cooperation on biofuels“ und unterstützt die Erarbeitung entsprechender Nationaler Aktionspläne in El Salvador, Haiti und der Dominikanischen Republik. Ferner unterstützt die IADB die Meso-American Biofuels Working Group. 2006 hat die IADB eine Sustainable Energy and Climate Change Initiative (SECCI) angestoßen, die auf vier Säulen aufbaut. Eine dieser Säulen sind Biokraftstoffe, die anderen drei sind „Erneuerbare Energien und Energieeffizienz“, „Verbesserter Zugang zur Finanzierung durch den Kohlenstoffmarkt“ und „Anpassung an den Klimawandel“ (IADB, 2008). Im April 2008 hat die SECCI eine Partnerschaft mit dem Roundtable on Sustainable Biofuels angekündigt, um die dort zu erarbeitenden Nachhaltigkeitskriterien in ihre eigene Vergabepraxis zu integrieren und die Beteiligung der lateinamerikanischen Stakeholder in diesem Prozess zur globalen Standardsetzung zu unterstützen (IADB, 2008). Insgesamt ist die IADB an etwa 50 Bioenergieprojekten sowohl im privaten als auch im öffentlichen Sektor beteiligt (ein Drittel ist bereits genehmigt, zwei Drittel sind noch in der Vorbereitung). Diese Projekte haben auch Energieeffizienz- und Carbon Finance-Komponenten, ihr Budgetvolumen liegt in der Summe über 1 Mrd. US-$ (persönliche Mitteilung, G. Meerganz von Medeazza, IADB).

10.8.1.2 Programme und Sonderorganisationen der Vereinten Nationen

Die Förderung und Nutzung nachhaltiger Energie gewann im Kontext der Vereinten Nationen vor allem durch die auf einen Interessensausgleich zwischen Nord und Süd bedachten Beschlüsse des Erdgipfels

von Rio de Janeiro (United Nations Conference on Environment and Development, UNCED 1992) an Bedeutung. Dies schlug sich explizit auch im energiepolitischen Mandat der 1992 von der UN-Generalversammlung etablierten Kommission für Nachhaltige Entwicklung (CSD) nieder. Die CSD ist jedoch weitgehend wirkungslos geblieben und insbesondere mit dem für ihre 14. und 15. Sitzung (2006/2007) anberaumten „Energiezyklus“ gescheitert (IISD, 2007; Mittler, 2008). Die CSD-16, die 2008 den „Landwirtschaftszyklus“ einläutete, betonte zwar die allgemeinen Risiken der Bioenergie, lässt aber ebenfalls keine konkreten politischen Beschlüsse erwarten (IISD, 2008). 2002 wurde mit UN Energy eine weitere übergreifende Institution eingerichtet, die innerhalb der Vereinten Nationen als Schnittstelle für energiepolitische Aktivitäten unterschiedlicher UN-Organisationen fungieren soll und die sich zunehmend auch mit dem Thema Bioenergie befasste (UN-Energy, 2007a). So veröffentlichte UN-Energy 2007 einen Bericht zur nachhaltigen Nutzung von Bioenergie „Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision Makers” (UN-Energy, 2007b). Darin werden die generellen Zusammenhänge von Bioenergie und nachhaltiger Entwicklung sowie Möglichkeiten zur Förderung von Bioenergie in Entwicklungs- und Schwellenländern erörtert. Demnach sind Standardisierung und Zertifizierung von Bioenergieprodukten notwendig, um deren Nachhaltigkeit zu gewährleisten. UN-Energy ist jedoch nicht in der Position solche Prozesse voranzutreiben oder gar aktiv von den betreffenden UN-Organisationen einzufordern. So bleiben die spezialisierten UN-Organisationen und Programme, die im Bioenergiesektor aktiv sind, weitaus wichtiger für strategische Entscheidungen und konkrete Fördermaßnahmen.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit stehen nachfolgend diejenigen UN-Institutionen im Fokus, die sich explizit mit der Förderung von Bioenergie befassen und die generell im Bereich der Entwicklungszusammenarbeit aktiv sind: UNDP, UNEP, UNIDO und UNCTAD. Weitere UN-Institutionen, die ebenfalls beide Themenbereiche berühren, dies aber in einem anderen übergeordneten Kontext tun, werden an anderer Stelle thematisiert, so z.B. FAO im Kontext Welternährung (Kap. 10.4), CBD im Kontext Naturschutz (Kap. 10.5).

Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen (UNDP)

Die Verbesserung der Energieversorgung ist für das Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen (UNDP) ein klassisches Aufgabenfeld, das von den Entwicklungsländern stark nachgefragt und als wesentlicher Beitrag zur Armutsbekämpfung angesehen wird. Eine systematische Berücksichtigung klimapolitischer Erwägungen und eine strategische Ausrichtung auf erneuerbare Energien und Bioenergie zur Bekämpfung der Energiearmut sind dabei bislang nicht erkennbar.

Es bleibt abzuwarten, in wie weit aktuelle Bemühungen um eine engere und verbesserte operative Zusammenarbeit mit dem Umweltprogramm UNEP zu entsprechenden programmatischen Anpassungen bei UNDP führt (Bauer, 2008). Das gilt insbesondere für die auf der Weltklimakonferenz von Nairobi 2006 vorgestellte Partnerschaft zum Klimaschutz (UN, 2006). In deren Rahmen wollen UNEP und UNDP Entwicklungsländer u.a. gezielt in der Nutzung des CDM unterstützen. Unabhängig von der konkreten Zusammenarbeit mit UNEP betrachtet es UNDP ausdrücklich auch als seine Aufgabe, Entwicklungsländern durch die Förderung sauberer Energietechnologien Zugang zu Investitionen zu verschaffen, wie sie u.a. durch die Globale Umweltfazilität (GEF) und den CDM unterstützt werden.

Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP)

Das UN-Umweltprogramm UNEP ist sichtlich um eine aktive Rolle in der internationalen Bioenergiepolitik bemüht und betont die Zusammenhänge der Produktion und Nutzung von Bioenergie mit den klassischen UNEP-Themen Treibhausgasemissionen, Verlust der Artenvielfalt, Degradation von Wasserressourcen sowie Bodendegradation. Vor diesem Hintergrund engagiert sich UNEP in verschiedenen Prozessen und Partnerschaften, wie z.B. der bereits angesprochenen gemeinsamen Klimaschutz-Initiative mit UNDP oder durch aktive Beteiligung an der Global Bioenergy Partnership (GBEP, Kasten 10.3-4). Absehbar könnte außerdem die Relevanz von Bioenergie für die Umsetzung und Weiterentwicklung der Biodiversitätskonvention CBD an Bedeutung gewinnen, deren Sekretariat bei UNEP angesiedelt ist (Kap. 10.5).

Bezüglich der Bereitstellung von Bioenergieexpertise ist vor allem das UNEP Risoe Centre on Energy, Climate and Sustainable Development erwähnenswert, dessen Experten das UNEP allgemein zu Fragen bezüglich erneuerbarer Energien beraten und die Studien zur Weiterentwicklung erneuerbarer Energien in Entwicklungs- und Schwellenländern erstellen (z.B. Kejun et al., 2007; La Rovere et al., 2007). Hinzu kommen eine Reihe kleinerer Projekte und öffentlich-private Partnerschaften, wie etwa die auf Nachhaltigkeitsaspekte von Biokraftstoffen konzentrierten und federführend von UNEP betriebenen Aktivitäten des International Panel for Sustainable Resource Management und ein geplantes GEF-Projekt, in dem gemeinsam mit FAO, UNIDO und der Internationalen Energieagentur die Kenntnisse

über die Nachhaltigkeit von Biokraftstoffen verbessert und entsprechende Richtlinien erarbeitet werden sollen (Fritsche und Hennenberg, 2008).

Grundsätzlich hebt das Umweltprogramm bei all diesen Aktivitäten die Potenziale der Bioenergie im Sinne des UNEP-Mottos „Environment for Development“ hervor. Eine umfassende und kohärente Bioenergiestrategie ist dabei allerdings noch nicht zu erkennen. Vielmehr zeigt sich die typische Rolle des UNEP als Wissensmanager, der Informationen synthetisiert und für Entscheidungsträger aufbereitet, um politische Prozesse voranzutreiben und Themen zu setzen. In der Summe spiegeln die kleinteiligen Aktivitäten des Umweltprogramms vor allem die strukturellen Schwächen wider, mit denen sich das UNEP im institutionellen Dickicht der Vereinten Nationen nach wie vor konfrontiert sieht (Biermann und Bauer, 2004).

Organisation der Vereinten Nationen für Industrielle Entwicklung (UNIDO)

Energie und Umwelt ist einer von drei Themenschwerpunkten der UN Organisation für Industrielle Entwicklung, deren Kernmandat die Förderung nachhaltiger industrieller Entwicklung in Entwicklungsländern ist. Das 1985 zur Sonderorganisation aufgewertete vormalige UN Programm könnte also grundsätzlich eine wichtige Rolle bei der Förderung klimafreundlicher Technologien in Entwicklungsländern spielen.

Die gegenwärtige Energiepolitik der UNIDO konzentriert sich auf die Steigerung industrieller Energieeffizienz und den Ausbau erneuerbarer Energien. Mit Blick auf erneuerbare Energien fördert die UNIDO neben kleinskaligen Wasserkraftprojekten („Mini-Hydro“), Solarenergie und Windkraft auch die energetische Nutzung von Biomasse. Die Biomass Energy Projekte der UNIDO konzentrieren sich bislang auf die Verwertung industrieller und landwirtschaftlicher Reststoffe wie u.a. Bagasse (Zuckerrohrrückstände), forstwirtschaftliche Holzabfälle und Viehdung, wobei unterschiedliche Nutzungsformen angewandt werden. Die Förderung solcher beispielhafter Kleinprojekte ist positiv zu bewerten und sollte systematisch ausgebaut werden. Parallel dazu erarbeitet die UNIDO zur Zeit in Kooperation mit dem oben beschriebenen GEF-Projekt des UNEP eine eigene Biokraftstoffstrategie.

UN Konferenz für Handel und Entwicklung (UNCTAD)

Die UN Konferenz für Handel und Entwicklung hat im Juni 2005 eine „UNCTAD Biofuels Initiative“ ins Leben gerufen, die Forschung, Analyse, technische Kooperation und Konsensbildung im Bereich Biokraftstoffe vorantreiben soll. Dazu wurde im gleichen Jahr eine internationale Expertengruppe eingesetzt, die Entwicklungsländer länderspezifisch zu technischen Fragen bezüglich der Produktion von und des internationalen Handels mit Biokraftstoffen beraten soll. Entwicklungsländer sollen bei der Entwicklung geeigneter Strategien unterstützt werden, um ihre Chancen bei Produktion, Nutzung und Handel mit Biokraftstoffen, die nachhaltig produziert wurden, besser nutzen zu können. In diesem Zusammenhang werden auch unterschiedliche Investitionsmöglichkeiten bewertet, einschließlich der möglichen Nutzung des CDM für Biokraftstoffprojekte. Nicht zuletzt soll die UNCTAD Biofuel Initiative zum Treffpunkt für bereits existierende Initiativen inner- und außerhalb der UN werden (UNCTAD, 2008a).

Das Abschlussdokument der 12. Sitzung der UNCTAD, die im April 2008 in Accra, Ghana, tagte, äußert sich bezüglich der nachhaltigen Entwicklungspotenziale von Biokraftstoffen vorsichtig zurückhaltend: „Countries should also exchange experiences and analysis, in order to further explore the sustainable use of the biofuels alternative in a way that would promote social, technological, agricultural and trade development, while being aware of countries' needs to ensure a proper balance between food security and energy concerns“ (UNCTAD, 2008b). Die Arbeit der UNCTAD Biofuels Inititaive sei in diesem Sinne fortzusetzen, um Handels- und Entwicklungsgewinne für Entwicklungs- und Transformationsländer zu maximieren und gleichzeitig die potenziellen negativen ökologischen und sozialen Gefahren der Biokraftstoffproduktion zu minimieren (UNCTAD, 2008b).

10.8.1.3 Entwicklungszusammenarbeit der Europäischen Union und der Bundesrepublik

Initiativen der Europäischen Union

Seit 2005 definiert die Europäische Union den Zugang zu Energie als zentrales Aufgabenfeld der Entwicklungszusammenarbeit, um Armut in den Schwellen- und Entwicklungsländern zu bekämpfen (EU-Kommission, 2005e). Zusammen mit den Mitgliedstaaten hat die Europäische Kommission verschiedene Programme aufgelegt, welche die Förderung und Verbreitung erneuerbarer Energien in Entwicklungsländern, darunter energetische Biomassenutzung, zum Ziel haben. Das erfolgt vor allem im Rahmen der EU Energie-Initiative zu Armutsbekämpfung und Nachhaltigen Entwicklung (EUIE) über das COOPENER-Programm (2003–2006 17 Mio. € Kofinanzierung), die ACP-EU Energy Facility (220 Mio. €) und der Partnership Dialogue Facility. Außerdem unterstützt die EU den Global Energy Efficiency

and Renewable Energy Fund (GEEREF) (120–150 Mio. €) sowie weitere multilaterale Initiativen, in deren Kontext energetische Biomassenutzung eine Rolle spielt. Energie bildet ferner einen wichtigen Baustein in der EU-Afrika Strategie (EU-Kommission, 2005f, 2008c).

Ziel der genannten EU-Programme ist die unmittelbare Armutsbekämpfung durch den Zugang zu Energiedienstleistungen (z.B. EU-Kommission, 2004). Die energetische Biomassenutzung ist dabei nur *eine* technische Option unter vielen anderen, die zur Verbesserung der ländlichen Energieversorgung gefördert wird. Dabei liegt ein Schwerpunkt auf der effizienteren Nutzung traditioneller Biomasse – auf Haushaltsebene oder im Bereich von Kleingewerbe. Auch im Bereich der Stromerzeugung wird die Nutzung von Biomasse berücksichtigt (Intelligent Energy, 2007; Europe Aid, 2007).

Die Förderung von flüssigen Biokraftstoffen spielt im Rahmen der genannten Energieprogramme eine untergeordnete Rolle. So ist z.B. das Programm Gota Verde in Honduras das einzige Flüssigkraftstoffprogramm im Rahmen von COOPENER. Die vereinzelte Förderung kleinskaliger Biokraftstoffproduktion und Nutzung erfolgt aber auch im Rahmen anderer thematischer Schwerpunkte, z.B. das Projekt zum Umwelt- bzw. Waldschutz „RE-Impact: Rural Energy Production from Bio-energy Projects: Providing regulatory and impact assessment frameworks, furthering sustainable biomass production policies and reducing associated risks“. Im Zusammenhang mit nachhaltiger Landnutzung ist im Rahmen des 6. EU-Forschungsrahmenprogramms das Projekt „COMPETE: Competence Platform on energy crop and agroforestry systems – Africa“ hervorzuheben. Dabei handelt es sich um ein mit internationalen Partnern in multidisziplinärem Rahmen durchgeführtes Projekt mit dem Ziel, die moderne nachhaltige Bioenergienutzung in ariden und semi-ariden Regionen Afrikas zu fördern und entsprechende Kapazitäten aufzubauen (COMPETE, 2008).

Obwohl die Förderung von Biokraftstoffen in Entwicklungsländern als Teil der Biokraftstoffstrategie der Union angekündigt wurde, hat sich diese Zielsetzung bisher nicht in spezifischen Förderinstrumenten der EU-Entwicklungszusammenarbeit niedergeschlagen. In einem Strategiepapier aus dem Jahr 2006 wurden Biokraftstoffe als Chance für Entwicklungsländer beschrieben, denn sie könnten zur Diversifizierung der Produktionsstrukturen, zur Reduzierung des Einsatzes fossiler Energieträger und zum Wirtschaftswachstum beitragen (EU-Kommission, 2006b). Länder wie Brasilien könnten über den Handel mit Roh- und Biokraftstoffen weltweit die Nachfrage nach Kraftstoffen bedienen. Als EU-Fördermaßnahmen wurden damals eine Reform der Zuckerpolitik (zur Entwicklung des Ethanolsektors), spezielle Unterstützungsprogramme („Biofuel Assistance Packages“) und die Einrichtung lokaler, nationaler und regionaler Bioenergieplattformen angeregt. Trotz der Ankündigungen konzentriert sich die direkte und indirekte Förderung von Biokraftstoffen auf die heimischen EU-Produzenten und deren Rohstoffe. Auch die zugesagte Handelsliberalisierung im Bereich Zucker und Ethanol wurden bisher nicht umgesetzt (ODI, 2008). Zwar werden im Rahmen der Reform der europäischen Zuckerpolitik Länder mit Zuckerindustrien wie z.B. Mauritius, Jamaika oder Fidschi beim Aufbau von Ethanol-Kapazitäten unterstützt, allerdings handelt es sich dabei nur um minimale Beihilfen, die zudem keinen Umwelt- und Sozialstandards unterliegen.

Die ehrgeizige europäische Strategie zum Ausbau von Biokraftstoffen wird deshalb nicht zuletzt aufgrund mangelnder Kohärenz mit anderen EU-Politiken, wie etwa in den Bereichen Entwicklung, Ernährungssicherheit und Handel kritisiert (EU Coherence, 2008). So lässt sich feststellen, dass insbesondere in der Entwicklungszusammenarbeit der Europäischen Union eine integrierte und ausreichend finanzierte Strategie fehlt, die die Potenziale der energetischen Biomassenutzung für Armutsbekämpfung, ländliche Entwicklung und Klimaschutz auslotet und dabei alle Anwendungsformen der Bioenergie – Strom, Wärme, Kraftstoffe für Mobilität – berücksichtigt. Die von der EU beanspruchte Vorreiterrolle in der globalen Klimaschutzpolitik sollte aber gerade auch mit der Entwicklungszusammenarbeit korrespondieren.

Initiativen des BMZ und der Durchführungsorganisationen der deutschen Entwicklungszusammenarbeit

Zur entwicklungspolitischen Positionierung der Bundesregierung in Bezug auf Bioenergie hat das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung ein Diskussionspapier speziell zu Biokraftstoffen vorgelegt, das vor dem Hintergrund der gemeinsamen Anhörung der Bundestagsausschüsse für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz sowie für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vom 20. Februar 2008 sowie der Plenardebatte zur Novellierung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 21. Februar 2008 zu sehen ist (BMZ, 2008c). Die Diskussion konzentriert sich bislang stark auf die Chancen und Risiken von Biokraftstoffen, eine breiter angelegte Bioenergiestrategie wird aber bislang nicht erkennbar.

Hinsichtlich der Relevanz von Biokraftstoffen für die deutsche Entwicklungszusammenarbeit warnt die Bundesregierung vor den erheblichen sozia-

len und ökologischen Risiken sowie ungesicherten Erwartungen und orientiert sich entsprechend an einer Maxime der Risikominimierung. Entwicklungschancen auf Grundlage einer exportorientierten Biokraftstoffproduktion in Entwicklungsländern werden skeptisch beurteilt. Vielmehr sollten dezentrale Versorgungs- und Energiesysteme zum direkten Nutzen der lokalen Bevölkerung gefördert werden (BMZ, 2008c).

Die politische Steuerung der Entwicklungszusammenarbeit im Bioenergiebereich soll durch klare ökologische und soziale Nachhaltigkeitskriterien angepasst werden, um Risiken zu minimieren. Durch Pilotversuche mit Zertifizierungssystemen und deren Weiterentwicklung sowie verstärkter Forschungsanstrengungen für verbesserte Landnutzungssysteme und angepasste Bioenergiequellen soll kurzfristig dem Umstand Rechnung getragen werden, das ein angemessenes internationales Regelwerk vorerst nicht zu erwarten ist. Eine weitere wesentliche Aufgabe der bilateralen deutschen Entwicklungszusammenarbeit wird darin gesehen, Partnerländer bei der Umsetzung nationaler Ernährungssicherungsstrategien sowie von Biomassestrategien in einer Weise zu beraten, „die dem jeweiligen nationalen Potenzial angemessen und in ein Gesamtkonzept der ländlichen Entwicklung integriert sind“ (BMZ, 2008c). Wie solche Strategien in den Partnerländern umgesetzt werden sollten, bleibt aber angesichts der offenen Fragen bezüglich einer eigenen Bioenergiestrategie unklar.

Weniger skeptisch als das BMZ beurteilt die KfW Entwicklungsbank in einer eigenen Positionsbestimmung die Chancen, die sich tropischen Ländern durch den Anbau von Energiepflanzen und die Möglichkeit zum Export von Biokraftstoffen bieten (KfW, 2008). Insgesamt entsteht so ein von Unsicherheit geprägtes Bild, wie es sich auch bei anderen mit Bioenergie befassten Akteuren und Institutionen auf allen Ebenen finden lässt. Entsprechend groß sind die Gestaltungspotenziale mit Blick auf noch immer ergebnisoffene Strategieentscheidungen. Das Gutachten des WBGU kann hier als Entscheidungshilfe dienen und die entwicklungspolitischen Akteure ermutigen, im Sinne einer nachhaltigen Nutzung vorhandener Bioenergiepotenziale stärker aktiv zu werden.

Unterhalb dieser generellen strategischen Ebene leisten die Durchführungsorganisationen bereits wichtige Beiträge zur Ausschöpfung der entwicklungspolitischen Potenziale unterschiedlicher Nutzungsformen von Bioenergie in den Partnerländern der deutschen Entwicklungszusammenarbeit. Hier sind vor allem die Aktivitäten des Kompetenzzentrums Energie der KfW Entwicklungsbank sowie das Sektorvorhaben Bioenergie der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) zu nennen, wie beispielsweise das auf die Haushaltsebene zielende HERA-Programm der GTZ und die damit verbundene BEST-Initiative zur Förderung nationaler auf Biomasse basierender Energiestrategien (Kap. 10.8.2.1).

10.8.1.4 Status Quo der internationalen Entwicklungszusammenarbeit im Bereich der Bioenergie

Angetrieben von der Diskussion um Biokraftstoffe, ist Bioenergie aktuell zu einem „heißen“ Thema der Entwicklungspolitik geworden, zu dem nahezu alle einschlägigen Akteure Stellungnahmen und Positionspapiere verfasst oder Arbeitsgruppen eingerichtet haben. Dabei ist Bioenergie teilweise schon länger Bestandteil von Strategien zur Überwindung von Energiearmut oder auch von Programmen zur Förderung erneuerbarer Energien. So befassen sich neben den hier beschriebenen multilateralen Entwicklungsbanken und UN-Organisationen auch spezifische transnationale Partnerschaften und Netzwerke wie z.B. die Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership (REEEP) oder Renewable Energy Network (REN21) mit unterschiedlichen Aspekten der Förderung von Bioenergie.

An der gegenwärtigen internationalen entwicklungspolitischen Bioenergiediskussion fällt aber auf, dass die Bekämpfung der Energiearmut in Entwicklungsländern durch Effizienzverbesserungen bei der traditionellen Bioenergienutzung und durch moderne energetische Nutzungsformen von Biomasse keine zentrale Zielsetzung der Politik darstellt. Dieser Eindruck wird durch die auf Biokraftstoffe verengte Diskussion noch verstärkt. Biokraftstoffe für den nationalen Verkehrssektor stellen jedoch nur einen speziellen Anwendungsbereich der energetischen Biomassenutzung dar. Eine integrierte Betrachtung der unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten und -bedürfnisse für Elektrizität, Wärme, und Mobilität und deren Potenziale für die wirtschaftliche Entwicklung dieser Länder findet in der gegenwärtigen Diskussion aber kaum statt.

Auch werden die energiepolitischen Portfolios der internationalen Akteure der Entwicklungszusammenarbeit insgesamt weiterhin von konventionellen Energiesystemen und Großwasserkraft dominiert. Ein weiteres Hemmnis, stärker im Bereich der Bioenergie – speziell im Energiepflanzenanbau – aktiv zu werden, scheint in den Unwägbarkeiten bezüglich der damit verbundenen Chancen und Risiken zu liegen. Zwar gewinnt das Thema Bioenergie bei nahezu allen Akteuren der internationalen Entwicklungszusammenarbeit an Aufmerksamkeit, vor groß

angelegten Förderprogrammen wird bislang jedoch zurückgeschreckt.

Die Vereinten Nationen bieten hier ein besonders fragmentiertes Bild. Ihre Institutionen und Initiativen, die umwelt-, entwicklungs-, agrar- und energiepolitische Aktivitäten im Bereich der Bioenergie koordinieren sollen, entfalten keine durchschlagende Wirkung. Sie bleiben, wie im Fall der Kommission für Nachhaltige Entwicklung, teilweise sogar noch hinter den bescheidenen Erwartungen zurück, die man mit Rücksicht auf strukturelle Schwächen überhaupt nur an sie stellen kann. Zumindest teilweise lässt sich das diffuse Bild auch mit den unterschiedlichen Erwartungen und Ansprüchen der Mitgliedsstaaten gegenüber verschiedenen UN-Organisationen und Programmen erklären. So erwarten viele Entwicklungsländer z. B. von UNDP und UNIDO vor allem auch technische und finanzielle Unterstützung ihrer konventionellen energiepolitischen Strategien und Programme. Hinzu kommt, dass auch die einschlägigen UN-Akteure von der Dynamik und Komplexität des Bioenergiethemas überfordert sind und vielfach erst begonnen haben, nach überzeugenden Lösungen für die mit Bioenergie verbundenen Nutzungskonflikte zu suchen und daher eher abwartend agieren, wie das Beispiel der Entwicklungsbanken zeigt. Angesichts der bisherigen Zurückhaltung bleiben wichtige Gestaltungsspielräume für Strategiebildung und politische Steuerung bestehen. Die Kehrseite der Medaille ist, dass, von Ausnahmen wie der Inter-American Development Bank abgesehen, kaum eine internationale Organisation über umfassende Bioenergiestrategien verfügt, während viele Entwicklungsländer bereits konkrete Schritte zur Förderung von Biokraftstoffen unternehmen, ausländische Investoren auf die Anbauflächen und Märkte des Südens drängen und der Energiepflanzenanbau nicht zuletzt in Ländern wie Brasilien, Malaysia und Indonesien einen Boom erlebt. Kleinteilige Initiativen und Pilotprojekte, die sich auf die Nachhaltigkeit von Biokraftstoffen konzentrieren, aber dieses größere Bild eines im Entstehen begriffenen dynamischen Weltmarkts für Bioenergie außer Auge lassen, bleiben unzureichend, auch wenn sie sinnvolle Bausteine für umfassendere Ansätze liefern mögen. Die maßgebliche Dynamik kommt dabei aus dem Privatsektor. Dennoch verfügen die Akteure der multilateralen Entwicklungszusammenarbeit, und unter ihnen insbesondere die Finanzierungsinstitutionen, durchaus über geeignete Mittel, diese Entwicklung mitzugestalten. Nach Auffassung des WBGU sollten sie ihren Einfluss im Sinne der Leitplanken zur Nachhaltigkeit (Kap. 3) und der entsprechenden Mindeststandards und Förderkriterien (Kap. 10.3.1) geltend machen, in dem sie dazu beitragen, in den Entwicklungsländern geeignete Rahmenbedingungen für die nachhaltige Nutzung der vorhandenen Bioenergiepotenziale zu schaffen.

Es fehlt an entsprechenden Politiken und Strategien, die es ermöglichen, die unterschiedlichen Potenziale der Bioenergie in den Bereichen Elektrizität Wärme und Mobilität zu nutzen, ohne wesentliche Nachhaltigkeitsziele wie Welternährung, Klima- und Naturschutz zu unterminieren. Nationale wie internationale Mandatsträger brauchen dafür kurzfristig geeignete Entscheidungsgrundlagen, um den Bioenergiesektor angemessen regulieren und Weichen für seine zukünftige Ausgestaltung stellen zu können. Nicht zuletzt drängen auch kapitalkräftige Privatinvestoren, die an langfristiger Planungssicherheit interessiert sind, auf klare und verlässliche Rahmenbedingungen.

Um die Erkenntnisse aus der Vielzahl der in den vergangenen zwei bis drei Jahren aus dem Boden geschossenen Foren, Task Forces, Kommissionen und Gutachten zu bündeln und den internationalen Lernprozess zu den Chancen und Risiken der Bioenergie ergebnisorientiert zu beschleunigen, rät der WBGU, zeitnah eine Internationale Konferenz über nachhaltige Bioenergie einzuberufen. Nach dem Vorbild der Renewables Konferenz von 2004 könnte eine International Conference on Sustainable Bioenergy (Kap. 10.7.7.2) als Forum für einen länder- und sektorübergreifenden Dialog und mögliche Kooperationen in der internationalen Agrar-, Energie- und Entwicklungspolitik dienen und zur globalen Konsensbildung über angemessene Normen bezüglich der Produktion und der Nutzung unterschiedlicher Formen der Bioenergie beitragen. Sie sollte auch den Grundstein zur Förderung nachhaltiger Bioenergie durch spezifische multilaterale Partnerschaften legen, die sich an bereits existierenden Technologieabkommen oder Handelspartnerschaften zwischen Industrieländern und Schwellenländern orientieren könnten.

10.8.2 Bioenergiestrategien für Entwicklungsländer

Die Akteure der internationalen Entwicklungszusammenarbeit sollten die Schwellen- und Entwicklungsländer darin unterstützen, ihre Bioenergiepotenziale auf nachhaltige Art und Weise zu nutzen. Die Klärung strategischer Fragen der Bioenergiepolitik sollte dabei vor dem Hintergrund bestehender naturräumlicher, politischer, sozioökonomischer und infrastruktureller Rahmenbedingungen vorrangig auf nationaler Ebene und unter möglichst breiter Beteiligung betroffener Interessens- und Bevölkerungsgruppen erfolgen. Gleichzeitig müssen auf internationaler Ebene geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden, um nationale Strategien so

zu flankieren, dass eine im globalen Maßstab nachhaltige Bioenergiepolitik möglich wird.

Auf allen Handlungsebenen ist dabei generell zu klären, welche Ziele vorrangig durch Bioenergie erreicht werden sollen. Daraus lassen sich entsprechend weitere Fragen nach Rohstoffgewinnung (Pflanzenkultur, Reststoffe) und Nutzungsform der Bioenergie (Wärme, Elektrizität oder Mobilität) ableiten. Auch die Frage, mit welchen Förderpolitiken diese Ziele in nachhaltiger Weise erreicht werden können, muss beantwortet werden. Da Bioenergie stets nur eine von mehreren Möglichkeiten darstellt, diese Ziele zu erreichen, muss parallel geprüft werden, ob nicht geeignetere Alternativen existieren.

Wie Kapitel 8 zeigt, sind die Strukturen zur Energieversorgung in Entwicklungsländern sehr unterschiedlich und es bestehen zum Teil erhebliche Defizite bezüglich der zu erbringenden Energiedienstleistungen: Von der Nachfrage nach einfachster Technologie zum Kochen bis hin zur flächendeckenden Strom- und Kraftstoffversorgung. Diese unterschiedlichen Anwendungen und Bedürfnisse müssen in eine Gesamtstrategie eingebunden werden. Um zu einer Bewertung zukünftiger Bioenergiepotenziale in Entwicklungsländern zu gelangen und um zu beurteilen, ob und wie deren Realisierung gegebenenfalls durch die internationale Entwicklungszusammenarbeit gefördert werden kann, betrachtet der WBGU dabei folgende vier Dimensionen der Produktion und der Nutzung von Bioenergie:

- ökologische und sozioökonomische Nachhaltigkeit (Kap. 3 und 5),
- energetische Potenziale (Kap. 6),
- technologische Möglichkeiten und Machbarkeiten (Kap. 7–9),
- Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Nutzungspfade (Kap. 7–9).

Aus Sicht des WBGU ist grundsätzlich förderungswürdig, was signifikant zum Klimaschutz und anderen Nachhaltigkeitszielen beiträgt, oder zur Beseitigung von Energiearmut bzw. Gesundheitsgefährdungen geeignet ist und sich zugleich in das Leitbild der Energiewende zur Nachhaltigkeit einfügt. In diesem Sinne werden nachfolgend die zentralen Elemente zur Entwicklung nachhaltiger Bioenergiestrategien in Entwicklungsländern erörtert.

10.8.2.1 Bekämpfung der Energiearmut durch netzunabhängige ländliche Energieversorgung

Der WBGU sieht in der Überwindung der Energiearmut, d.h. der Möglichkeit des Zugangs zu erschwinglichen, zuverlässigen, qualitativ hochwertigen, sicheren, gesundheitlich unbedenklichen und umweltschonenden Energiedienstleistungen zur Deckung der Grundbedürfnisse, eines der wesentlichen Ziele der globalen Energiewende (Kap. 2; WBGU, 2003a). Moderne Bioenergienutzung kann dazu einen wichtigen Beitrag leisten. Eine Verbesserung der traditionellen ineffizienten, gesundheits- und umweltschädlichen Bioenergienutzung oder ihr Ersatz durch andere emissionsarme Energieformen ist aus Sicht des WBGU zur Überwindung der Energiearmut unbedingt geboten. Klein- bis mittelskalige Lösungen bieten für große Bevölkerungsgruppen in Entwicklungsländern beträchtliche Entwicklungschancen, die schnellstmöglich ausgeschöpft werden sollten (Kap. 9.2.2). Eine aufwändige Prüfung der mit Bioenergienutzung verbundenen Risiken ist bei diesen meist auf Haushaltsebene ansetzenden Lösungen in der Regel verzichtbar. So können verschiedene auf Biomasse basierende Technologien zur Bekämpfung der Energiearmut sowohl im ländlichen als auch im städtischen Raum und zum Klimaschutz beitragen.

Einige dieser Technologien können besonders kostengünstig und einfach umgesetzt werden. Dazu zählen der Einsatz von verbesserten Holzherden, Kleinbiogasanlagen sowie lokal erzeugtem und genutztem Pflanzenöl. Ob die Voraussetzungen zum Betreiben dieser Technologien vorliegen, vor allem auch, ob die notwenigen Input vorhanden sind, muss jeweils vor Ort geprüft werden. Energieeffiziente Holzöfen und Herde sowie Kleinbiogasanlagen reduzieren den Feuerholzbedarf, tragen zur Innenraumluftverbesserung bei, reduzieren die Emission von Treibhausgasen und verringern den Zeitaufwand, der zum Sammeln von Feuerholz notwendig ist. Im städtischen Raum kann durch effizientere Holzkohleherde der Holzkohleverbrauch reduziert werden. Durch Biomassevergasung von Reststoffen und Abfällen können Gas- bzw. Dieselgeneratoren betrieben und zur ländlichen Elektrifizierung eingesetzt werden. Auf lokaler Ebene kann außerdem Pflanzenöl, das beispielsweise aus auf marginalen Böden angebauten *Jatropha* gewonnen werden kann, universell zur Stromerzeugung in Dieselgeneratoren, der Bereitstellung von mechanischer Energie (Mahlen, Wasserpumpen) oder in der Mobilität eingesetzt werden (Kap. 8.2 und 9.2.2). In Städten sind die Bedingungen zur Überwindung der Energiearmut anders, da der Zugang zu Energiedienstleistungen hier häufig vor allem ein Verteilungsproblem darstellt.

Status Quo und Hemmnisse

Dass eine Verbesserung der bestehenden Bioenergienutzung eine wichtige Rolle bei der Beseitigung der Energiearmut und damit für Armutsbekämpfung und menschliche Entwicklung spielt, ist keine neue Erkenntnis. Dies wurde auf dem Weltgipfel für

Nachhaltige Entwicklung in Johannesburg (WSSD) deutlich hervorgehoben (EUEI und GTZ, 2006). So kann beispielsweise durch den Einsatz von verbesserten Biomasseherden der Holzverbrauch um die Hälfte oder ein Viertel verringert werden (Kap. 7.2). Damit steigt die Versorgungssicherheit für eine große Gruppe von Menschen, die von Energiearmut betroffen sind. Gleichzeitig gehen die enormen negativen gesundheitlichen Auswirkungen zurück.

Die Fortschritte beim Ersatz ineffizienter Herde sind viel versprechend: Zurzeit werden weltweit 220 Mio. energieeffiziente Herde genutzt. Dazu haben eine Vielzahl von öffentlichen Programmen und auch der Markt beigetragen. Insgesamt hängen 570 Mio. Haushalte von traditioneller Biomassenutzung zum Kochen ab. In China existieren beispielsweise ca. 180 Mio. verbesserte Herde, das entspricht 95 % aller Haushalte die zum Kochen auf die traditionelle Biomassenutzung angewiesen sind. In Indien entsprechen ca. 34 Mio. verbesserte Herde ca. 25 % solcher Haushalte. In anderen Ländern wurden ebenfalls Erfolge erzielt, jedoch bislang nicht auf gleichem Niveau. In Afrika werden beispielsweise nur ca. 8 Mio. energieeffizientere Holz- und Holzkohleherde genutzt, deren Einsatz durch Verbreitungs- und Vermarktungsstrategien gefördert wurden. Ein Drittel aller afrikanischen Länder haben jedoch vielfach in Zusammenarbeit mit der internationalen Entwicklungszusammenarbeit Programme für verbesserte Biomasseherde aufgelegt. So hat sich z.B. Uganda 2007 das Ziel gesetzt, die Anzahl der verbesserten Herde bis 2017 auf 4 Mio. zu erhöhen (Kasten 8.2-2; REN21, 2008).

Das Haushaltsenergieprogramm der GTZ (HERA) zur Verbreitung energieeffizienter Herde oder das Biogasprogramm der niederländischen Entwicklungsorganisation SNV veranschaulichen, dass die Entwicklungszusammenarbeit grundsätzlich sehr gute Beiträge zur Verbesserung der ländlichen Energieeffizienz unter Armutsbedingungen leisten kann. Die GTZ hat beispielsweise Märkte für energiesparende und emissionsarme Herde aufgebaut und im Auftrag der deutschen und holländischen Regierungen damit in den vergangenen vier Jahren 1 Mio. Haushalte erreicht (GTZ, 2007c). Über die SNV konnten in den vergangenen fünf Jahren etwa 25.000 Familien in Vietnam mit Kleinbiogasanlagen mit integrierten Toilettenanlagen ausgestattet werden, welche Biogas zur Licht- und Kochwärmeerzeugung nutzen (DMFA, 2008; SNV, 2008).

Dies sind wichtige Leistungen, die verstärkt und breitenwirksam fortgeführt werden sollten, um Energiearmut und damit Armut allgemein zu bekämpfen und stärker zum Ressourcenschutz und zur Emissionsminderung beizutragen. Jedoch beinhaltet die Bekämpfung der Energiearmut mehr als nur die Bereitstellung energieeffizienter Herde und Kleinbiogasanlagen. Auch hinsichtlich Elektrizitätsversorgung und Mobilität bieten sich Biomassevergasung und Pflanzenöle als kleinskalige Lösungen zur Bekämpfung der Energiearmut an (Kap. 8.2). Hierbei konnten bislang allerdings nur exemplarische Erfolge erzielt werden. Beispielsweise werden in Indien und China kleine Biovergasungsanlagen zur Elektrizitätserzeugung eingesetzt. In Indien wird die Gesamtkapazität an Vergasungsanlagen auf ca. 70 MW geschätzt, wobei zehn nationale Hersteller die Biomassevergaser in Verbindung mit den entsprechenden Motoren anbieten (Loy, 2007; REN21, 2008). Der prozentuale Beitrag von Biomasse zur Bruttostromerzeugung betrug in Indien 2004/2005 jedoch nur 0,03 % (Loy, 2007).

Gründe für die schleppende Verbreitung dieser kostengünstigen, einfachen Technologien liegen sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite. Auf der Angebotsseite werden die energiepolitischen Portfolios der Akteure der internationalen Entwicklungszusammenarbeit nach wie vor von konventionellen „modernen“ Energiesystemen dominiert: Für Geberorganisationen, Regierungen in Entwicklungsländern und private Investoren sind große Infrastrukturprojekte attraktiver als kleinskalige Ansätze in dünn besiedelten ländlichen Räumen mit schwachen Marktstrukturen. Erschwerend kommt hinzu, dass die relative Größenordnung des Nutzwärmebedarfs von Haushalten und Gewerbe auf der Ebene nationaler Energiepolitik sowie die Möglichkeiten moderner Anwendungen der energetischen Biomassenutzung z.B. zur Stromversorgung unterschätzt oder ihre generelle Relevanz für die Energieversorgung schlichtweg übersehen wurde (EUEI und GTZ, 2006). Dabei weisen Experten für ländliche Entwicklung immer wieder darauf hin, dass gerade für die am wenigsten entwickelten Länder die einfachen technologischen Möglichkeiten von größter Bedeutung sind (REN21, 2008). Auch erscheinen Produktion und Vertrieb von energieeffizienten Herden oder Kleinbiogasanlagen für potenzielle lokale Anbieter unattraktiv, da die Nachfrage gering ist. Vielfach ist auch ein Informationsdefizit auf der Nachfrageseite zu vermuten: Viele ländliche Haushalte in Entwicklungsländern sind nicht ausreichend über effiziente Alternativen der Feuerholzverbrennung informiert sowie skeptisch gegenüber neuen Technologien und zu erwartender Folgekosten, z.B. bei der Anschaffung neuer Kochgeräte. Auch bleibt der Leidensdruck vielerorts noch relativ begrenzt, da sich Heizmaterialien wie Feuerholz immer noch finden lassen und, ähnlich wie bei der Wasserversorgung, ein hoher Zeitaufwand für die Beschaffung als normal betrachtet wird. Dies geht vor allem zu Lasten von Frauen und Mädchen, denen diese Zeit für

Erwerbstätigkeit oder für Schule und Ausbildung fehlt.

Bei der Einrichtung einer netzunabhängigen ländlichen Stromversorgung, die auf Biomasse basiert, ergeben sich zusätzliche Hemmnisse. Sie entstehen sowohl beim Zugang zur Technologie, beispielsweise durch hohe Kosten für die Anfangsinvestition, fehlende Vertrautheit und Zahlungsbereitschaft und -fähigkeit der Endnutzer. Sie bestehen aber auch bei der Fortführung bestehender Projekte, z.B. wegen unzureichender Investitionen in Wartung und Instandhaltung (Valencia und Caspari, 2008).

Bekämpfung der Energiearmut priorisieren

Umfassende Strategien zur Bekämpfung der Energiearmut setzen voraus, dass die Prioritäten in der Entwicklungszusammenarbeit entsprechend angepasst werden. Dazu muss sich die internationale Gemeinschaft explizite Ziele setzen, bis wann der Ausstieg aus den gesundheitsschädlichen Formen der traditionellen Bioenergienutzung erreicht werden sollte. Der WBGU empfiehlt, dass dieses Ziel bis 2030 vollständig umgesetzt sein sollte. Zur erfolgreichen Umsetzung einer solchen Strategie müssen Umsetzungshemmnisse besser verstanden und überwunden werden; dazu sind sowohl länderübergreifende Querschnittsevaluierungen als auch lokal explizite Untersuchungen notwendig. Allerdings ist auch für eine Förderung einer netzunabhängigen Energieversorgung auf nationaler bzw. lokaler Ebene ein gewisses Maß an politischer und gesellschaftlicher Rahmensetzung notwendig. Zur Finanzierung bieten sich neben den Mitteln der öffentlichen Entwicklungszusammenarbeit, Mikrofinanzsysteme und öffentlich private Partnerschaften (PPPs) an (Kap. 12.5; WBGU, 2003a). Auch eine Zulassung von kleinskaligen CDM-Projekten zur Effizienzverbesserung bei der traditionellen Bioenergienutzung ist begründbar und kann daher die Finanzierung unterstützen (Kap. 10.2.3.1). Die Überwindung der traditionellen Biomassenutzung sollte aus Sicht des WBGU Priorität vor allen anderen entwicklungspolitischen Strategien der Bioenergienutzungen haben. Dies gilt insbesondere in den ca. 75 Ländern, in denen über 50 % der Energieversorgung im Haushaltsbereich durch Bioenergie gedeckt wird, und noch dringlicher in den ca. 50 Ländern, in denen dieser Anteil bei über 90 % liegt.

10.8.2.2 Modernisierung der Energiesektoren und Exportproduktion

Entscheidendes Element zur Überwindung von Energiearmut ist der Zugang zu Elektrizität und damit einhergehend die Modernisierung der Energiesektoren in den Entwicklungsländern. Wie die Bestandsaufnahme in Kapitel 8 gezeigt hat, sind grundsätzlich auch fortgeschrittene Technologien der energetischen Biomassenutzung zur dezentralen Stromversorgung und zur Wärmeerzeugung in ländlichen Gebieten geeignet. So kann die energetische Nutzung von Biomasse auch zur Modernisierung des gesamten Energiesektors inklusive des Verkehrs beitragen und neben der Verbesserung der Selbstversorgung potenziell auch Chancen für die Exportwirtschaft bieten (Kap. 8.2.2; Kasten 8.2-3).

Wie die Modellierungsergebnisse aus Kapitel 6 zeigen, gibt es in einem Teil der Entwicklungs- und Schwellenländer beachtliche Potenziale für den nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen, und zwar überwiegend in tropischen und subtropischen Breiten. Vom modellierten globalen nachhaltigen Potenzial aus Energiepflanzen, das 6–25 % der heutigen Primärenergienachfrage entspricht, entfallen ca. 22–24 % auf Mittel- und Südamerika 12–15 % auf Afrika südlich der Sahara, 12–13 % auf China und angrenzende Länder, 7–8 % auf die GUS-Staaten sowie weitere 3–6 % auf Südasien. Die größten zusammenhängenden Flächen liegen dabei im Übergangsbereich von Sahelzone und afrikanischen Savannen, im südlichen Afrika und auf dem indischen Subkontinent. Allerdings bestehen Datenunsicherheiten bezüglich der gegenwärtigen Landnutzung. Um diese nachhaltigen Potenziale realisieren zu können, müssen entsprechende institutionelle Rahmenbedingungen geschaffen und Kapazitäten aufgebaut werden, welche die Akteure in diesen Großregionen zur Einhaltung der Nachhaltigkeitsanforderungen befähigen (Kap. 6.7). Von besonderer Bedeutung ist hier die Vermeidung von unerwünschten direkten und indirekten Landnutzungsänderungen, die die Ernährungssicherheit beeinträchtigen, den Erhalt der Biodiversität gefährden oder zu hohen Treibhausgasemissionen führen können. Dafür müssen sowohl internationale Rahmenbedingungen geschaffen und verbessert, als auch nationale Anstrengungen unternommen werden.

Die internationale Entwicklungszusammenarbeit kann und sollte diese Länder bei einer nachhaltigen Realisierung dieser Potenziale entsprechend unterstützen. Das kann auch solche Länder einschließen, in denen die gegenwärtigen politischen und sozioökonomischen Bedingungen ungünstig sind, in denen Bioenergie aber mittel- bis langfristig zur wirtschaftlich nutzbaren Ressource werden kann, die eine positive Entwicklungsdynamik verstärken könnte. In Ländern, die bereits über Anbauflächen für Energiepflanzen verfügen, sollte entsprechend eine nachhaltige Ausgestaltung der Bioenergieproduktion eingefordert und unterstützt werden. Wo die nachhaltigen Potenziale für einen Energiepflanzenanbau aber

Abbildung 10.8-1
Entscheidungshilfe zur Entwicklung von Bioenergiestrategien in Entwicklungs- und Schwellenländern. Die roten Pfeile verweisen auf WBGU-Empfehlungen.
Quelle: WBGU aufbauend auf Vermeulen et al., 2008

schon heute ausgeschöpft oder auch langfristig kaum zu realisieren sind, sollte ein Ausbau der Bioenergieproduktion hingegen grundsätzlich nicht gefördert werden.

Der Anbau und die Nutzung von Bioenergie verlaufen in der Regel auf lokaler und nationaler Ebene. Trotzdem gehen von der internationalen Ebene positive wie negative Anreize aus, die sich auf die Nutzung der Bioenergie in den Entwicklungsländern auswirken und somit Chancen und Risiken beeinflussen. Damit für eine nachhaltige Produktion und Nutzung von Bioenergie in Entwicklungs- und Schwellenländern günstige internationale Rahmenbedingungen

entstehen können, sind nach Auffassung des WBGU folgende Elemente zu berücksichtigen:

- Das vom WBGU beschriebene Konzept der Leitplanken zeigt die Grenzen auf, in denen der Ausbau des Bioenergiesektors global tolerierbar ist. Eine nachhaltige Förderpolitik sollte daher die Leitplanken für Klima-, Biosphären- und Bodenschutz, den Zugang zu Nahrung und Energie sowie bezüglich Gesundheit und weiterer Nachhaltigkeitsanforderungen berücksichtigen. Die Bundesregierung sollte in der EU sowie in den Aufsichtsgremien internationaler Entwicklungsorganisationen die Beachtung dieser Leitplanken einfordern und u.a. darauf hinwirken, die 2°C-Leitplanke in der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) verbindlich festzuschreiben, Naturschutzgebiete auf 10–15 % der weltweiten Fläche auszuweiten und zur Sicherstellung elementarer Energiedienstleistungen eine weltweite Mindestversorgung von 700–1.000 kWh_{el} pro Kopf und Jahr anzustreben (Kap. 3).
- Eine Operationalisierung des Leitplankenkonzepts für die Bioenergieproduktion erfordert neben weiteren flankierenden Maßnahmen die Entwicklung und Durchsetzung weltweit gültiger Nachhaltigkeitsstandards und Zertifizierungssysteme. Entwicklungsländer sollten bei der Einrichtung und Umsetzung solcher Zertifizierungssysteme angemessen unterstützt werden. Multilaterale Entwicklungsbanken und internationale Finanzierungsinstitutionen sollten bei der Kreditvergabe für Bioenergieinvestitionen auf die Einhaltung von Nachhaltigkeitsstandards achten. Hierbei sollten der vom WBGU vorgeschlagene Mindeststandard sowie die Förderkriterien zugrunde gelegt werden (Kap. 10.3.1).
- Handelsschranken sollten grundsätzlich abgebaut werden, damit die Entwicklungs- und Schwellenländer ihre komparativen Vorteile bei der Produktion nachhaltiger Bioenergieträger und die damit verbundenen Entwicklungschancen nutzen können (Kap. 10.3.3). Die multilaterale Zusammenarbeit kann dabei durch spezifische zwischenstaatliche Partnerschaften gezielt ergänzt werden. So können z.B. Anbieter- und Nachfragerländer von Bioenergieprodukten Handelspartnerschaften eingehen, in denen gegen Zusicherung einer nachhaltigen Produktion unter Einhaltung des Mindeststandards freier Markzugang gewährt wird und eventuell zusätzlich spezialisierte Technologien ausgetauscht werden. Derartige Bioenergiepartnerschaften bieten sich auf Grund der dort vorhandenen Potenziale vor allem mit afrikanischen und lateinamerikanischen Ländern an (Kap. 6.7).
- Da auch die Zentren biologischer Vielfalt und die Flächen mit hoher Kohlenstoffspeicherung vielfach in Entwicklungsländern mit großen Bioenergiepotenzialen liegen, müssen entsprechende Flächen, wie insbesondere tropische Primärwälder, dort besonders geschützt werden. Um dies als nachhaltige Landnutzung finanzierbar zu machen, sollten internationale Kompensationszahlungen für entgangene Einkommen in der Land- und Forstwirtschaft geregelt und ausgebaut sowie verbindliche Vereinbarungen über reduzierte Entwaldung getroffen werden (Kap. 10.2 und 10.5.2.2).
- Ein kontrollierter Ausbau der Bioenergie sollte mit weltweiten Anstrengungen zur Stärkung der Landwirtschaft – vor allem in Entwicklungsländern – einhergehen, damit die zur Ernährungssicherheit notwendige Steigerung der Flächenproduktivität in der Nahrungsmittelproduktion erreicht werden kann (Kap. 10.4.3). Weil die Produktion von Bioenergie unter Umwidmung landwirtschaftlicher Nutzflächen die Ernährungssicherung gefährden kann, bedarf es eines globalen Monitorings der Landnutzung und geeigneter Risikovorsorge. Entsprechende Vorkehrungen sollten im Sinne systemweiter Kohärenz in den Bereichen Entwicklung, humanitäre Hilfe und Umwelt unter dem Dach der Vereinten Nationen getroffen werden (Kap. 10.4). Um Landnutzungskonkurrenzen allgemein besser verstehen und regeln zu können, sollte außerdem eine Globale Kommission zur nachhaltigen Landnutzung mit angemessener politischer Autorität eingesetzt werden (Kasten 10.3-6).

10.8.2.3 Kernelemente nationaler Bioenergiestrategien für Entwicklungsländer

Ohne wirksame politische Steuerung auf nationaler Ebene sind die Risiken der Bioenergienutzung kaum zu vermeiden. Neben einer potenziell negativen Klimabilanz des Energiepflanzenanbaus sowie dem Verlust an biologischer Vielfalt (z.B. durch Waldrodungen) drohen insbesondere Verdrängungseffekte zu Lasten der Nahrungsmittelproduktion und die Verdrängung kleinbäuerlicher Produktion durch den großflächigen Aufkauf von Land. Diese Risiken zu vermeiden und Bioenergieproduktion nachhaltig zu gestalten, bleibt vor allem eine Aufgabe nationaler Politik.

Gerade wenn Bioenergie zum Umbau nationaler Energiesektoren genutzt und Energiepflanzen auf großen Flächen angebaut werden sollen, brauchen Entwicklungs- und Schwellenländer länderspezifische Strategien, die den damit verbundenen

Chancen und Risiken gerecht werden. Unterschiedliche mit der Bioenergieproduktion verknüpfte Politikziele lassen sich über unterschiedliche Konversionspfade und Wertschöpfungsketten erreichen, Zielkonflikte entsprechend minimieren (z.B. in Indien: Kasten 10.8-1). Kernelemente einer Bioenergiestrategie müssen von den jeweiligen Regierungen länderspezifisch konkretisiert und unter Einbeziehung der betroffenen Akteure abgewogen werden. Großskalige Bioenergieinvestitionen in Entwicklungsländern sollten demnach ohne die vorherige Erstellung klar ausgearbeiteter und in ihrer Umsetzung realistischer Strategien und Nutzungskonzepte nicht getätigt und zumindest von Seiten der Entwicklungszusammenarbeit nicht unterstützt werden. Nur eine systematische Überprüfung der länderspezifischen Ziele und Voraussetzungen sowie eine Ausarbeitung der Bedingungen für eine nachhaltige Produktion – einschließlich der Abwägung möglicher Alternativen – kann einen ökologisch wie sozial nachhaltigen Ausbau nationaler Bioenergiesektoren gewährleisten (Entscheidungshilfe: Abb. 10.8-1). Die Entwicklungspolitik kann hierbei wichtige Beiträge leisten.

Biomasseproduktion und Anbausysteme in Entwicklungsländern

Die energetische Nutzung von biogenen Abfallstoffen sowie Reststoffen aus der Land- und Forstwirtschaft bietet viele Vorteile gegenüber dem Anbau von Energiepflanzen, z.B. entfallen weitgehend die Konkurrenzen mit bestehender Landnutzung und mögliche Emissionen aus Landnutzungsänderungen und Anbau. In den stark landwirtschaftlich geprägten Entwicklungsländern fallen erhebliche Mengen geeigneter Reststoffe an (z.B. in der Fischerei, in Sägewerken, Tee- und Kaffeeplantagen), die genutzt werden können (Kap. 7 und 8). Werden Reststoffe aus land- und forstwirtschaftlichen Flächen entnommen, muss ein wirksamer Bodenschutz gewährleistet sein. Da nicht eindeutig feststeht, wie hoch die nachhaltigen wirtschaftlichen Potenziale sind und wie diese ausgeschöpft werden können, besteht hier ein großer Forschungsbedarf. In Pilotvorhaben sollte die Mobilisierung und Nutzung von Abfall- und Reststoffen unterstützt und beste Anwendungen identifiziert werden.

Beim Anbau von Energiepflanzen sind insbesondere in Entwicklungsländern direkte und indirekte Landnutzungsänderungen (z.B. durch tropische Entwaldung, Konkurrenz zur Nahrungsproduktion) ein Risikofaktor. Landnutzungsänderungen beeinflussen die Treibhausgasbilanz entscheidend, weshalb der WBGU die direkte und indirekte Umwandlung von Wäldern und Feuchtgebieten ablehnt. Der Anbau von Energiepflanzen sollte deshalb auch in Entwicklungsländern auf solche Flächen beschränkt werden, deren Umwidmung für die Bioenergieproduktion Emissionen aus Landnutzungsänderungen weitgehend vermeidet, da hierdurch etwa die Hälfte der Klimaschutzwirkung verloren gehen kann oder sogar Klimaschäden ausgelöst werden (Kap. 7.3). Daher sollte für den Anbau von Energiepflanzen vor allem marginales Land gefördert werden. Da in Entwicklungsländern auch marginale Flächen häufig genutzt werden, ist dabei auf die Interessen lokaler Bevölkerungsgruppen zu achten und deren Partizipation sicherzustellen. Beim Anbau im Rahmen der Vertragslandwirtschaft sollte die faire Teilhabe von Kleinbauern an der Produktion gewährleistet werden (Kasten 8.2-3).

Auch die Wahl der Anbausysteme entscheidet über die Nachhaltigkeit der Produktion. Gemessen an den Nachhaltigkeitskriterien des WBGU sowie unter Berücksichtigung von Flächenerträgen sind mehrjährige Kulturen wie *Jatropha*, Ölpalme, Zuckerrohr und Kurzumtriebsplantagen mit schnell wachsenden Hölzern sowie Energiegräser einjährigen Anbaukulturen wie Raps, Getreide oder Mais grundsätzlich vorzuziehen. Wo immer möglich, sollten Pflanzengemische statt Monokulturen verwendet werden. Durch geeignete Anbausysteme kann zusätzlich organischer Kohlenstoff in den Boden eingebracht werden, was sowohl die Treibhausgasbilanz als auch die Bodenfruchtbarkeit verbessert (Kap. 7.1). Gerade in Entwicklungsländern ist Bioenergieproduktion deshalb als Instrument zur Desertifikationsbekämpfung und zur Restaurierung degradierter Böden einsetzbar (Kap. 10.6). Eine partizipative Landnutzungsplanung ist dabei unverzichtbar. Besonders sozial und ökologisch nachhaltige Anbausysteme sollten in diesem Sinne durch geeignete Pilotprojekte gefördert werden. Auch die Möglichkeit von Aufforstungen in Kombination mit nachhaltiger Nutzung sollte geprüft werden.

In der Summe sollte Bioenergie aus Energiepflanzen in Entwicklungsländern aus Sicht des WBGU nur dann gefördert werden, wenn einschließlich der Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen eine Klimaschutzwirkung eindeutig als positiv nachgewiesen ist und auch die anderen Nachhaltigkeitsdimensionen – Primat der Ernährungssicherung, Erhaltung biologischer Vielfalt, Schutz der Boden- und Wasserressourcen – eingehalten werden (Kap. 10.3.1).

Einbindung der Bioenergie in die Energiesysteme von Entwicklungsländern und sinnvolle Konversionspfade

Der WBGU zeigt, wie Bioenergie je nach Zielsetzung und gegebenen Strukturen der Energiesysteme in Entwicklungsländern nachhaltig verwendet werden kann. Neben ihrem verbesserten Einsatz zur lokalen

Kasten 10.8-1

Indien – *Jatropha*-Anbau als Entwicklungsmodell

Seit einigen Jahren und mit weltweit wachsendem Interesse wird der Anbau der *Jatropha*-Pflanze zur Biokraftstoffproduktion vorangetrieben. Auch Indien fördert seit 2003 verstärkt die Entwicklung von Biokraftstoffen auf der Basis von *Jatropha*. Ziel ist es, angesichts hoher und noch steigender Rohölimportquoten die Versorgungssicherheit zu erhöhen und die ländliche Entwicklung voranzutreiben. Als weitere Chancen werden die Fruchtbarmachung von degradiertem Land und der Klimaschutz genannt. Die Erwartungen wurden vom eigens gegründeten Ausschuss für Biodieselentwicklung 2003 sehr hoch gesteckt: Man ging davon aus, dass bis 2012 eine 20 %ige Beimischungsquote erreicht werden könnte. Dafür war der Anbau von *Jatropha* auf ca. 11,2 Mio. ha marginalen Flächen (wasteland), d.h. auf landwirtschaftlich schlecht genutztem bzw. minderwertigem und degradierten Land vorgesehen (Planning Commission, 2003). In einer nationalen „Biodiesel Mission" sollte die Produktion und Nutzung von Biodiesel getestet und entwickelt werden (TERI und GTZ, 2005). Einige Bundesstaaten, so z.B. Uttarakhand und Chattisgarh, legten ambitionierte Programme mit unterschiedlichen Förderinstrumenten vor, wodurch erste Anbauflächen und Raffineriekapazitäten geschaffen wurden. Mittlerweile hat die indische Regierung eine neue Biokraftstoffpolitik beschlossen. Bis 2017 sollen 20 % der Dieselnachfrage aus nachwachsenden Rohstoffen gedeckt werden (Economist, 2008b).

Trotz der großen Anstrengungen der letzten Jahre steckt die Entwicklung des indischen Biodiesel-Sektors noch in den Anfängen. Hauptgrund ist, dass der Anbau von *Jatropha* bisher nicht rentabel ist. Die Früchte können erst nach 3–5 Jahren geerntet werden und das Ertragspotenzial der Wildpflanze ist ohne zusätzliche Düngung und Wasserzufuhr sehr gering (Kap. 7.1). Die Subventionierung von fossilem Diesel erschwert die Rentabilität der Biodieselproduktion zusätzlich. Außerdem ist derzeit noch nicht absehbar, welche sozio-ökonomischen und ökologischen Folgen der Anbau mit sich bringt. Trotzdem lassen sich aus den bisherigen Erfahrungen einige Schlüsse ziehen:

Nach Altenburg et al. (2008) hängt die Schaffung von Entwicklungschancen durch die Biodieselproduktion wesentlich von der Organisation der Wertschöpfungskette ab. In Indien wurden viele unterschiedliche Ketten identifiziert, die sich in drei Kategorien einteilen lassen: Ein von der Regierung organisierter Anbau auf Staatsland, ein kleinbäuerlicher Anbau sowie ein von Großunternehmen initiierter Anbau. Die Kategorien unterscheiden sich im Wesentlichen in der Zielsetzung, der Verteilung der Anbaurisiken und des Landnutzungsrechts.

Ziel des von der Regierung organisierten Modells ist die ländliche Entwicklung und die Nutzbarmachung degradierten Landes. Der Anbau verläuft auf staatlichem Land und die Landarbeiter erhalten ein regelmäßiges Einkommen (sog. „collectors model"). In einigen Fällen bestehen Kooperationen mit der Privatwirtschaft (PPP-Modelle). Der Staat trägt das Risiko, unabhängig von einem im Markt zu erwirtschafteten Gewinn. Dadurch entstehen zusätzliche Beschäftigungs- und Einkommenschancen. Durch die Einbindung der Gemeinden, den sog. Panchayats, in den Anbau und die Entscheidung darüber, welches Land genutzt werden kann, werden Risiken der Vertreibung und der Gefährdung des Nahrungsmittelanbaus reduziert. Die Organisation verläuft meist im Rahmen staatlicher Förderprogramme, wie dem „Joint Forest Management" (JFM) Programme. Im Bundesstaat Andhra Pradesh hat dieses Modell die weiteste Verbreitung gefunden. Aufgrund hoher staatlicher Eingriffe ist jedoch fraglich, ob es jemals in einen nachhaltigen wirtschaftlich eigenständigen Entwicklungspfad überführt werden könnte.

Im zweiten Modell bewirtschaften mittelständische Bauern und Kleinbauern ihr eigenes Land. Da diese Landwirte auf unmittelbare Einkommensrückflüsse angewiesen sind, wird derzeit der Anbau nur zusätzlich zur eigentlichen Bewirtschaftung betrieben, z.B. in Form von Heckenpflanzung im Rahmen des „Fences for Fuel"-Programms in Rajastan. Dort nutzen die Landwirte das reine Pflanzenöl direkt für das Betreiben von Generatoren und Pumpen und tragen so zur lokalen Energieversorgung bei. In den meisten Fällen sind die Bauern jedoch in Abnahmeverträge mit Unternehmen eingebunden. In Pilotprojekten im Staat Karnataka unterstützt der Staat die Gründung von Kooperativen. Zwar garantiert der Zusammenschluss der Bauern noch keinen Markt, aber die Produktionsrisiken werden erheblich abgeschwächt und die Selbstorganisation und Selbstverantwortung der Kleinbauern wird unterstützt. Der *Jatropha*-Anbau kann so dazu beitragen, dass ungenutztes Land im Besitz von Kleinbauern wieder produktiv eingesetzt werden kann.

Risiken ökologischer und sozialer Art werden vor allem im dritten Modell, dem von Unternehmen initiierten Anbau gesehen. Unternehmen, wie z.B. D1 Mohan Bio Oils Ltd. in Tamil Nadu, setzten auf großflächigen Anbau und Skaleneffekte. Durch ihr Kapital und Know-how können sie entsprechend Bewässerung und Nährstoffe bereitstellen. Das schafft zwar Potenzial für erheblichen Mehrertrag und ländliche Einkommens- und Beschäftigungsmöglichkeiten, aber Monokulturen und die Verdrängung des Nahrungsmittelanbaus könnten die Folge sein. Aufgrund der derzeit zu erzielenden niedrigen Marktpreise für Energiepflanzen besteht diese Gefahr jedoch momentan nicht.

Eine zentrale Rolle für die großflächige Produktion spielt der günstige Zugang zu Land. Unternehmen nutzen in erster Linie privates Land. Daneben stellen Bundesstaaten wie Chattisgarh staatliche Pachtflächen auf marginalen Flächen zum *Jatropha*-Anbau zur Verfügung. Diese Flächen werden jedoch oft von Viehhirten als Weide benutzt und es besteht die Gefahr, dass deren Nutzungsinteressen nicht berücksichtigt und Menschen vertrieben werden. In einzelnen indischen Bundesstaaten zeichnen sich deshalb schon heute Konflikte um die Landfrage ab (Grain, 2008; Peoples Coalition, 2008; Kasten 6.7-2). Damit die Risiken der großflächigen Produktion vermieden werden können, ist entscheidend, dass lokale Entscheidungsprozesse über die Nutzung und Verpachtung von Flächen partizipativ verlaufen. Noch sind diese Voraussetzungen jedoch nicht überall in Indien gegeben (Altenburg et al., 2008).

Zwar scheint das Entwicklungspotenzial der Biodiesel- und Pflanzenölproduktion in Indien trotz der teilweise ernüchternden Erkenntnisse hoch, aber Risiken des Ausbaus bestehen. Diese können jedoch durch die Wahl der Wertschöpfungsmodelle, die Zielsetzung der Regierung (lokale Energieversorgung versus nationaler bzw. globaler Markt) sowie geeignete partizipative Verfahren erheblich abgesenkt werden. Indien ist ein Vorreiter bei *Jatropha* für die Biodieselproduktion. Die bisherigen Erfahrungen mit dem Anbau und der Produktion in unterschiedlichen Fördermodellen bieten eine Chance, die Risiken und Potenziale des Ölpflanzenanbaus zu erforschen und bewährte Modelle und Methoden auch für andere Länder zu entwickeln.

Energieversorgung, auf Haushalts- und Dorfebene sowie in Kleinbetrieben kann Bioenergie grundsätzlich auch einen wichtigen Beitrag zur Modernisierung der Energiesektoren im urbanen-industriellen Kontext leisten. Wichtig ist dabei zu unterscheiden, ob Bioenergie im Bereich der Strom- und Wärmeversorgung oder im Verkehrssektor eingesetzt werden soll. Für den Klimaschutz erscheinen auch in Entwicklungsländern diejenigen Anwendungsbereiche am attraktivsten, bei denen fossile Energieträger mit hohen CO_2-Emissionen (vor allem Kohle) verdrängt werden (Kap. 9.2.1.3). Deshalb sind Nutzungspfade, die aus Bioenergie Strom erzeugen, in der Regel gegenüber der Nutzung von Biokraftstoffen für den Transport vorzuziehen. Die unter den gegebenen Rahmenbedingungen jeweils besten Anwendungen hängen jedoch stark von der gegebenen Energieversorgungsstruktur und den Kostenstrukturen ab. Dabei sind sowohl Gestehungs- als auch Treibhausgasvermeidungskosten relevant (Kap. 7.3).

Obwohl Entwicklungs- und Schwellenländer noch keine internationalen Verpflichtungen zur quantitativen Begrenzung ihrer Treibhausgasemissionen eingegangen sind, haben auch sie sich zum Klimaschutz bekannt. Gerade in wirtschaftlich schwächeren Ländern kann aber die absolute Menge an Treibhausgaseinsparungen kaum der entscheidende Faktor bei der Auswahl der Konversionssysteme sein. Bioenergiepfade, die besonders kostengünstige Klimaschutzoptionen darstellen, sollten jedoch auch in Entwicklungsländern mit höchster Priorität verfolgt werden. Nicht zuletzt können bei niedrigen Treibhausgasvermeidungskosten auch neue Finanzierungsquellen über internationale Klimaschutzinstrumente erschlossen werden. Daher sollten solche Konversionspfade für die Bioenergienutzung angestrebt werden, die bei relativ hoher Vermeidungsleistung pro eingesetzter Menge an Biomasse geringe Treibhausgasvermeidungskosten haben. Wichtig ist dabei vor allem, Technologien einzusetzen, die einen Übergang hin zu einem modernen Energiesystem mit niedrigen Treibhausgasemissionen erlauben. Eine ineffiziente Infrastruktur sollte deshalb nicht verstetigt werden. Unter diesen Gesichtspunkten sind folgende Anwendungen insbesondere für Entwicklungs- und Schwellenländer von Interesse:

Bei der Strom- und Wärmeversorgung führen diejenigen Pfade, bei denen feste Biomasse in Kohlekraftwerken mitverbrannt wird, zu hoher Treibhausgasvermeidung bei geringen Vermeidungskosten. Besonders positiv ist hierfür die Nutzung biogener Reststoffe aus Land- und Forstwirtschaft (z.B. Stroh, Hackschnitzel, Bagasse usw.), Kaskadennutzung und die Energiepflanzennutzung in Form von Holz- oder Gräserpellets. Mitverbrennung ist dort besonders günstig, wo der Kohleanteil an der Stromversorgung hoch ist, wie z.B. in den wachsenden Schwellenländern Indien und China. Der große Vorteil der stationären Nutzung liegt darin, dass die Abwärme genutzt werden kann. Wegen ihres hohen energetischen Wirkungsgrads ist die KWK-Technik grundsätzlich der reinen Stromproduktion vorzuziehen, sofern die Nachfrage nach der Wärme gegeben ist. Gerade für Regionen mit hohem Kälte- bzw. Kühlbedarf lässt sich die KWK auch zur Kälteerzeugung einsetzen.

In Ländern wie Brasilien könnte Ethanol aus Zuckerrohr direkt in Gas- und Dampfkraftwerken eingesetzt werden. Auch der Einsatz von Flüssigkraftstoffen (z.B. Pflanzenöl und Bioethanol) in Blockheizkraftwerken (BHKW) hat eine höhere Klimaschutzwirkung als deren Einsatz im Verkehr. Allerdings haben diese Bioenergiepfade relativ hohe Gestehungs- und Treibhausgasvermeidungskosten, falls die Infrastruktur neu aufgebaut werden muss. Als teure Klimaschutzoption sind sie daher für eine mögliche Finanzierung über Klimaschutzinstrumente weniger attraktiv. Diese Optionen sollten deshalb vor allem durch Entwicklungszusammenarbeit und Technologiekooperationen unterstützt werden. In Ländern wie z.B. Uganda, in denen die Stromversorgung größtenteils durch Wasserkraft erfolgt, ist der Einsatz von Biomasse als Flüssigkraftstoff im Verkehr sinnvoll, wenn dadurch fossile Kraftstoffe verdrängt werden. Eine noch größere Klimaschutzwirkung könnte allerdings erreicht werden, wenn die in tropischen Ländern produzierte Biomasse bzw. Pflanzenöl und Bioethanol zur Verstromung in BHKW eingesetzt oder exportiert würden. In urbanen Zentren können breit angelegte Programme zur Einführung von BHKW den Neubau großer Kohlekraftwerke vermeiden. Die Produzenten von Biokraftstoffen haben dadurch eine gesicherte Abnahme und (mehr) Investitionssicherheit.

Nicht zuletzt ist Biomethan ein flexibler Energieträger, der eine nahezu universelle Nutzung ermöglicht. Ausgangsstoff ist entweder Biogas, das aus der Vergärung feuchter Biomasse in Biogasanlagen entsteht, oder Synthesegas aus der Vergasung von überwiegend fester Biomasse. Die Vergasung ist allerdings gegenwärtig noch vergleichsweise teuer (Kap. 7.2). Im Gegensatz zur direkten Nutzung des Bio- bzw. Synthesegases in dezentralen Stromerzeugungsanlagen, kann Biomethan in Erdgasnetze eingespeist und so eine flexible Nutzung in unterschiedlichen Kraftwerkstypen erreicht werden. Die Biomethanoption ist jedoch nur in Schwellen- und Entwicklungsländern mit einem bereits ausgebauten oder in Entstehung befindlichen Gasnetz interessant. Über Pipelines oder die Verflüssigung (LNG) kann Biomethan jedoch auch einfach transportiert und exportiert werden (Kap. 8.1.2.2, 8.1.2.3 und 9.2.1.4).

Im Transport- und Verkehrssektor sind Biokraftstoffe für Entwicklungs- und Schwellenländer insoweit eine Option, als sowohl Bioethanol als auch Biodiesel problemlos in Entwicklungs- und Schwellenländern produziert werden können. So lange Elektromobilität nicht etabliert ist und Verbrennungsmotoren ersetzen kann, ist der Anbau tropischer Energiepflanzen auf degradiertem Land zur Herstellung von Biokraftstoffen eine kostengünstige Klimaschutzoption. Biodiesel aus *Jatropha* und Bioethanol aus Zuckerrohr ermöglichen Treibhausgaseinsparungen zu geringen Kosten, wenn der Anbau zu einer Kohlenstoffspeicherung im Boden führt und keine indirekten Landnutzungsänderungen ausgelöst werden. Eine Finanzierung über Klimaschutzinstrumente könnte dadurch ermöglicht werden. Auch in diesem Fall könnten jedoch über die Stromproduktion höhere Treibhausgaseinsparungen erzielt werden. Damit die alte Verkehrsinfrastruktur auch in Entwicklungsländern nicht verstetigt wird, sollte daher eine gezielte Förderung in Richtung Verstromung und Elektromobilität erfolgen. Sofern die Produktion der Biokraftstoffe dem Mindeststandard entspricht, eröffnen sich hier Chancen für die Exportwirtschaft zur Verstromung der Flüssigkraftstoffe in BHKW z.B. in den Industrieländern (Kap. 8.1.2.1 und 9.2.1.4).

Es lassen sich also verschiedene Pfade identifizieren, die zur klimafreundlichen Modernisierung der Energiesektoren im urbanen-industriellen Kontext in Entwicklungs- und Schwellenländern durchaus sinnvoll sind. Hier bieten sich den tropischen Ländern durch den nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen große Potenziale und außerdem Chancen zur ländlichen Entwicklung und Erschließung von Exportmärkten. Wie das Beispiel des Ölpalmenanbaus unter Berücksichtigung von direkten und indirekten Landnutzungsänderungen aber unmissverständlich zeigt, liegen gerade beim Energiepflanzenanbau die größten Risiken: Erfolgt der Ölpalmenanbau auf degradiertem Land, ergeben sich sehr hohe Treibhausgasminderungspotenziale. Wird für den Anbau Tropenwald abgeholzt, so verkehrt sich die positive Bilanz in ihr komplettes Gegenteil. Die Frage des Anbaustandorts und der Durchsetzung einer nachhaltigen Produktion sind somit essentiell für die Beurteilung des Nutzens und der Einschätzung der Förderpolitik für eine nachhaltige Ausweitung der Bioenergienutzung. Um die vorhandenen nachhaltigen Potenziale zu nutzen, sollte die Entwicklungszusammenarbeit die Partnerländer in ihrer Strategiebildung unterstützen und auf eine Einhaltung des Mindeststandards und der Förderkriterien bei größerskaligen Anwendungen hinwirken. Dafür sollten die notwendigen institutionellen Kapazitäten wie Landnutzungsplanung, Zertifizierung usw. zur Gestaltung einer nachhaltigen Bioenergienutzung gestärkt werden. Besonders soziale und ökologisch nachhaltige Anbausysteme sollten von der Entwicklungszusammenarbeit aktiv in Pilotprojekten gefördert werden. Um viel versprechende Technologien (KWK, BHKW, GuD, Mitverbrennung usw.) zum Durchbruch zu verhelfen und um einen effektiven Technologietransfer zu ermöglichen, sollten mit Hilfe von Fördermaßnahmen (Entwicklungszusammenarbeit, öffentlich-private Partnerschaften usw.) ausgewählte Konversionspfade der Bioenergie gefördert werden. Darüber hinaus könnten CDM-Projekte verstärkt genutzt werden (Kap. 10.2.3).

10.8.3 Handeln unter Unsicherheit: Schlussfolgerungen für eine aktive Förderpolitik

Aus Sicht des WBGU bestehen die entwicklungspolitischen Chancen der Bioenergie insbesondere in der Substitution traditioneller Formen der Biomassenutzung durch effizientere Technik sowie im dezentralen Einsatz von Bioenergie zur lokalen Produktion von Wärme und Elektrizität. Beides hilft, Armut zu reduzieren und die Millenniumsentwicklungsziele zu erreichen. Nicht zuletzt trägt ein effizienterer Einsatz von Brennmaterialien zur Verminderung von Treibhausgasemissionen und somit zum Klimaschutz bei. Bei der Bekämpfung von Energiearmut in Entwicklungsländern durch modernisierte Bioenergienutzung ergeben sich somit eindeutige win-win-Konstellationen. Ferner kann Bioenergie auch in Entwicklungsländern grundsätzlich einen wichtigen Beitrag zur Modernisierung der Energiesysteme leisten und somit auch zum klimafreundlichen Umbau des Weltenergiesystems insgesamt.

Die Entwicklungspolitik muss zuvorderst die Rahmenbedingungen dafür schaffen, um die auf Grundlage des gegenwärtigen Wissenstandes zur Bioenergie gewonnenen methodischen und analytischen Erkenntnisse in der Entwicklungszusammenarbeit anwenden und operationalisieren zu können. Damit einhergehend sollte sie die Institutionalisierung nationaler und internationaler Regulierungsrahmen verfolgen, die nicht-intendierte Effekte der Bioenergienutzung ausschließen und diesbezüglich insbesondere die Treiber potenzieller Landnutzungskonflikte im Blick behalten, die vor allem Entwicklungsländer betreffen werden. Insbesondere die Konkurrenz zwischen den Erfordernissen einer dynamischen Bioenergiewirtschaft und der Ernährungssicherung kann nur sinnvoll bearbeitet werden, wenn die entsprechenden Nachhaltigkeitsstandards und Leitplanken bei der Entwicklung und Umsetzung einer globalen Bioenergiepolitik berücksichtigt werden. Das

Gutachten zeigt, dass ein aus klima- und energiepolitischer Perspektive nennenswerter Ausbau der Bioenergie nur dann vertretbar ist, wenn in den kommenden Jahren zugleich hohe Investitionen in die Landwirtschaft der Entwicklungsländer getätigt werden, um die Ernährungssicherheit weltweit zu verbessern. Theoretisch vorhandene Bioenergiepotenziale dürfen keinesfalls auf Kosten der Ernährungssicherheit ausgeschöpft werden.

Dabei ist offenkundig, dass auch die hier präsentierten Erkenntnisse nicht frei von Unsicherheiten sind. Vielmehr wird deutlich, dass es absehbar weiteren Informations- und Forschungsbedarf hinsichtlich der Nachhaltigkeit zukünftiger Bioenergienutzung gibt (Kap. 11). Prioritäten und Ansatzpunkte für eine entwicklungsorientierte Forschung zur nachhaltigen Produktion und Nutzung von Bioenergie sind im nachfolgenden Kapitel als Forschungsempfehlungen konkret benannt (Kasten 11-1). Die Akteure der internationalen Entwicklungspolitik müssen die vorhandenen Wissenslücken im Rahmen ihrer jeweiligen Strategiebildung berücksichtigen und akzeptieren, dass im Bioenergiesektor unter Bedingungen der Unsicherheit und entsprechend unter Beachtung des Vorsorgeprinzips entschieden und gehandelt werden muss.

Forschungsempfehlungen 11

Die Befassung mit Bioenergie hat für den WBGU vor allem eines gezeigt: Es handelt sich hier um ein Handlungsfeld mit großen Wissensdefiziten und damit hohem Forschungsbedarf. Der erhebliche politische Handlungsdruck zur Umgestaltung der Energiesysteme verlangt jedoch heute Entscheidungen, die unter großen Unsicherheiten getroffen werden müssen. Daher rät der WBGU einerseits robuste win-win-Lösungen bereits jetzt anzustreben, andererseits aber verstärkte, auch international koordinierte Forschungsanstrengungen zu unternehmen.

Auch wenn der WBGU mit diesem Gutachten bereits in Teilbereichen einen gangbaren Korridor für eine nachhaltige Bioenergienutzung ausweisen kann, bleiben Wissensdefizite, die in den kommenden Jahren durch weitere Forschung sowohl disziplinär als auch in integrierenden Studien beseitigt werden müssen. Die sechs wichtigsten Forschungsfelder sind im Kasten 11-1 zusammengestellt. Im Anschluss daran werden differenzierte Forschungsempfehlungen vorgestellt.

Deutschland engagiert sich bereits intensiv in der Forschung zum Globalen Wandel, wie die zahlreichen Aktivitäten des BMBF in den Bereichen „Umwelt und Nachhaltigkeit“ sowie „Energie“ zeigen. Im Rahmen der Hightech-Strategie gibt es z.B. die Förderaktivität „BioEnergie 2021 – Forschung für die Nutzung von Biomasse“. Auch das 4. Kolloquium des NKGCF mit dem Schwerpunkt „Landnutzung im Spannungsfeld von Ressourcenschutz, Nahrungs- und Energienachfrage“ machte deutlich, dass die globale Landnutzung bereits seit einigen Jahren ein etabliertes Forschungsfeld ist. Auch international wird diesen Fragen beispielsweise im Rahmen von IGBP und IHDP sowie im europäischen Forschungsrahmenprogramm nachgegangen. Für die Erforschung der Bioenergie wurde jüngst von der Regierung das deutsche Zentrum für Biomasseforschung in Leipzig eingerichtet. Speziell der Nachweis der Klimaschutzwirkung und die dafür relevanten Treibhausgasbilanzen von Bioenergienutzungspfaden stellen nach Sicht des WBGU derzeit noch eine große Schwachstelle in der Bewertung von Bioenergie dar, weshalb auf diese Thematik ein verstärkter Augenmerk gelegt werden sollte.

Dem WBGU geht es hier besonders darum, jene Forschungsfragen zu thematisieren, die sich speziell während der Erstellung des vorliegenden Gutachtens ergeben haben. Dabei erheben die hier vorgestellten Forschungsempfehlungen nicht den Anspruch, ein systematisches und vollständiges Portfolio für die Bioenergieforschung zu beschreiben.

11.1 Bioenergienutzung und Klimabilanz

11.1.1 Verbesserung der Treibhausgasbilanzierung beim Anbau von Bioenergie

Die energetische Nutzung von Biomasse ist in der Regel nicht CO_2-neutral, vielmehr ist die Klimabilanz von Biomassenutzung außerordentlich komplex. Biomasse setzt zwar bei der Verbrennung nur soviel CO_2 frei, wie sie vorher aus der Atmosphäre gebunden hat; jedoch entstehen Emissionen auch in der Gewinnung, Bereitstellung und Verarbeitung der Biomasse zu Bioenergie mit sehr wesentlichen Nebeneffekten. Abhängig vom Boden, dem Anbausystem und der vorherigen Landbedeckung kann eine Landnutzungsänderung zugunsten eines Biomasseanbaus zur Freisetzung von großen Kohlenstoffmengen führen. Auch beim Anbau von Energiepflanzen können erhebliche Mengen an Treibhausgasen freigesetzt und Dünger ausgewaschen werden. Wieviel Treibhausgasemissionen bei welchem Anbau typischerweise entstehen, ist meist nicht oder nicht hinreichend bekannt, belastbare Zahlen liegen kaum vor. Daher ist es unbedingt notwendig, vertiefte Studien für die wichtigsten Anbausysteme in Deutschland und Europa, aber auch in den Hauptproduktionsländern durchzuführen. Auch bei der Herstellung und dem Transport des Bioenergieträgers fallen weitere Treibhausgasemissionen an, die berücksichtigt werden müssen.

Kasten 11-1

Bioenergie und Landnutzung: Die wichtigsten Forschungsfelder

1. *Verbesserung der wissenschaftlichen Grundlagen zur globalen Landnutzung:* Um die wissenschaftlichen Grundlagen für den Aufbau eines globalen GIS-gestützten Landkatasters zu schaffen, muss der Zustand der globalen Landnutzung, Landbedeckung und des Bodens sowie die Dynamik globaler Landnutzungsänderungen genauer als bisher beobachtet und bewertet werden (Bai et al., 2008). Dazu sind u.a. die Erhebung von hochaufgelösten Daten über Vegetationsbedeckung, Wasserhaushalt und Bodenzustand, landwirtschaftliche Nutzung und Bodenversiegelung in den einzelnen Weltregionen erforderlich. Neben der Erarbeitung einheitlicher Indikatorensysteme ist für die Beobachtung und Erfassung dieser Dynamiken auch die Entwicklung von Methoden zur vergleichenden Interpretation der gewonnenen Daten erforderlich (Kap. 11.4.1).
2. *Bestimmung genauerer Treibhausgasbilanzen verschiedener Nutzungspfade der Bioenergie:* Die Treibhausgasbilanz ist die entscheidende Größe, die über den klimapolitischen Nutzen (oder in manchen Fällen Schaden) einer bestimmten Bioenergienutzung entscheidet. Sie lässt sich bislang nur ungenau bestimmen, z.B. was indirekte Wirkungen wie die Verdrängung bisheriger Landnutzung auf andere Flächen betrifft (Kap. 11.1).
3 *Bestimmung des Potenzials, der Treibhausgasbilanzen und der wirtschaftlichen Nutzungspfade für die Verwertung von Reststoffen.* Reststoffe u.a. aus Land- und Forstwirtschaft stellen ein noch kaum genutztes Potenzial zur Energieerzeugung dar, dessen künftige Nutzungsmöglichkeiten erforscht werden sollten (Kap. 11.3.2).
4. *Analyse der Rolle der Bioenergie in einem Energiesystem der Zukunft (national, regional, weltweit):* Die strategische Bedeutung und Einbindung von Bioenergie in die jeweiligen Energiesysteme (z.B. als Regelenergie) sollte näher untersucht werden. Dies ist mit entscheidend für die Wahl der bevorzugten Nutzungspfade, z.B. über den Einsatz von Biomethan (Kap. 11.3.1).
5. *Klärung der Zusammenhänge zwischen Ernährungssicherung und Bioenergie:* Die komplexen lokalen, nationalen und globalen Wirkungsketten zwischen Bioenergienutzung und Ernährungssicherung sollten einerseits aus sozio-ökonomischer Perspektive dringend erforscht werden. Andererseits sollten geopolitische Aspekte berücksichtigt werden: Könnte das „Primat der Sicherung der Energieversorgung“ der westlichen Welt und anderer mächtiger politischer Akteure in einem Weltenergiesystem, in dem Bioenergie eine wesentliche Komponente darstellt, dazu führen, Ernährungsprobleme in armen und politisch wenig einflussreichen Ländern zu verschärfen und wie ließen sich solche Szenarien durch internationale Kooperationsvereinbarungen verhindern? (Kap. 11.4.4.)
6. *Analyse von internationalen Landnutzungskonkurrenzen und Entwicklung von Elementen eines globalen Landnutzungsmanagementsystems:* Land wird in den kommenden Dekaden aufgrund unterschiedlicher Treiber (Bevölkerungswachstum, Veränderung von Ernährungsmustern, Nutzung von Biomasse zur Energieerzeugung, Wirkungen des Klimawandels) weltweit zu einem knappen Gut. Damit wird Landnutzung zu einem Gegenstand von Global Governance. Die Forschung sollte Interessenstrukturen im Bereich der weltweiten Landnutzung untersuchen und Beiträge zum Aufbau eines wirksamen globalen Regelwerkes zum Management von Landressourcen und zur Vermeidung von Landnutzungskonflikten leisten (Kap. 11.5).

Letztlich gilt dies nicht nur für Bioenergie, sondern auch für die Erzeugung von Nahrungsmitteln. Ein besseres Verständnis der Klimabilanz von Nahrungsmitteln kann helfen, landwirtschaftliche Praktiken klimafreundlicher zu gestalten und dem Verbraucher ermöglichen, sich durch gezielte Auswahl der Produkte weniger klimaschädlich zu ernähren.

11.1.2 Integrierte Bewertung von Klimaschutzoptionen der Land- und Biomassenutzung

Die Klima(schutz)wirkung von Bioenergie entscheidet sich nicht allein beim Anbau, sondern erst bei Betrachtung des gesamten Nutzungspfades. Dabei kann Klimaschutz durch die Nutzung von Biomasse über mehrere Wege erfolgen: Einerseits kann die in der Biomasse enthaltene Energie auf verschiedene Weise genutzt und damit auch unterschiedliche fossile Energieträger substituiert werden. Andererseits kann auch die Kohlenstoffspeicherungswirkung der Biomasse (entweder auf der Fläche oder in Form von Ernteprodukten) genutzt werden, wenn auf die energetische Nutzung (zumindest teilweise) verzichtet wird oder die stoffliche Nutzung vor der energetischen erfolgt. Die damit verbundenen Klimaschutzmaßnahmen weisen unterschiedliche Zeitdynamiken auf.

Daher werden integrierte Studien benötigt, die die verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten über den gesamten „Lebenszyklus“ vergleichen und so helfen, mit der nur in begrenztem Umfang verfügbaren Biomasse die bestmögliche Klimaschutzwirkung zu erzielen. Diese Studien sollten anstelle relativer Einsparungen zu sehr uneinheitlichen fossilen Referenzssystemen Absolutwerte der Treibhausgas-Einsparungen ausweisen.

Bei der Bewertung von Bioenergieträgern mit Hilfe von Lebenszyklusanalysen werden bisher meist nur Treibhausgasemissionen aus direkten Landnutzungsänderungen berücksichtigt. Weil aber der Anbau von Rohstoffen zur Erzeugung von Bioenergieträgern in Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen (u.a. Nahrungs- und Futtermittelproduktion) steht, kann es in Folge der Konversion an anderer

Stelle zu weiterem Umbruch von Landflächen kommen, wenn die durch den Anbau von Energiepflanzen verdrängte Nutzung auf einer anderen Fläche fortgesetzt wird. Um auch die potenziellen zusätzlichen Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen bei der Bewertung der Nutzung von Energiepflanzen berücksichtigen zu können, wird eine neue Bewertungsmethodik benötigt. Diese Methodik sollte Informationen über die Vornutzung der betreffenden Fläche, ihre Produktivität sowie Kenntnisse über makroökonomische Determinanten der Flächennutzung innerhalb der betroffenen Länder (Hektarproduktivität, Anteil des Landes an internationalen Handels- und Stoffströme, wahrscheinliche spätere Art der Flächennutzung nach Konversion) und über die natürlichen Stoffflüsse bei der Konversion von Flächen so verknüpfen, dass ein möglichst realitätsnaher Indikator für die Auswirkungen indirekter Landnutzungsänderungen gewonnen wird. Der in diesem Gutachten verwendete „iLUC-Faktor“ (indirect land use change) des Ökoinstituts ist hier nur ein erster, noch sehr grober Ansatz.

11.1.3 Sequestrierung von biogenem Kohlenstoff im Erdreich und CO_2 in Depots

Es bestehen zwei Möglichkeiten, durch Biomasse der Atmosphäre Kohlendioxid dauerhaft zu entziehen: Die energetische Nutzung von Biomasse mit CO_2-Abtrennung und Einlagerung in einem Depot und die Lagerung von fester Holzkohle im Erdreich. Die Fähigkeit von Pflanzen, den über die Photosynthese aus der Atmosphäre aufgenommenen Kohlenstoff aufzunehmen und zu speichern, eröffnet die Möglichkeit, ohne aufwendige Technik Kohlenstoff zu sequestrieren und gleichzeitig Energie zu gewinnen.

Energiepflanzen und Reststoffe können über Vergärung (Biogasanlagen) oder Vergasung (durch Erhitzen) zu Biomethan gewandelt werden. Im Herstellungsprozess muss das CO_2 ohnehin abgetrennt werden und kann anschließend in geeignete Lagerstätten gespeichert werden. Der Technologiezweig der Biogasanlagen ist weitgehend ausgereift, jedoch besteht für Biomassevergasungsanlagen noch Forschungsbedarf. Auf diese Weise kann vor allem trockene Biomasse energetisch genutzt und dabei gleichzeitig CO_2 der Atmosphäre mit der CCS-Technologie entzogen werden.

Des weiteren besteht die Möglichkeit, biogenen Kohlenstoff in Form von Holzkohle in das Erdreich einzulagern. Das bei der Verkohlung entstehende Gas kann zur Energiegewinnung genutzt werden, während die übrig bleibende Holzkohle entweder völlig aus der Biosphäre entfernt wird (Deponierung in tiefen Lagerstätten im Boden) oder – vorteihafter – in Böden eingebracht werden kann, wo sie als langlebiger Bodenverbesserer wirkt (Abbauraten von Holzkohle im Boden sind sehr gering). Es sollte genauer untersucht werden, wie lange der auf diese Weise im Boden gespeicherte Kohlenstoff der Atmosphäre entzogen bleibt, wie die Gesamt-Treibhausgasbilanz ausfällt und welche weiteren ökologischen Auswirkungen mit der Einbringung verbunden sind. Darüber hinaus ist das globale Potenzial dieser zu erforschenden Technologie unklar, ebenso wie die Frage ihrer ökonomischen Aspekte.

11.2 Nachhaltige Potenziale für Bioenergie

11.2.1 Landwirtschaftliche Probleme bei Anbau und Nutzung von Energiepflanzen

Optimierung des Anbaumanagements

Um die landwirtschaftliche Produktion zu steigern und gleichzeitig die ökologischen Ressourcen zu schonen, ist ein nachhaltiges Anbaumanagement erforderlich. Dazu zählen neben einem effizienten Wassermanagement auch ein optimales Düngeregime und eine extensive Bodenbewirtschaftung (z.B. no tillage-Verfahren). Großer Forschungsbedarf besteht noch im Bereich nachhaltiger Pflanzenanbausysteme zur rentablen Produktion von Biomasse auf degradierten und marginalen Flächen. Forschungsbedarf besteht auch für verschiedene Biomasse liefernde Pflanzen (z.B. Pongamia – *Pongamia pinnata*, Pfahlrohr – Arundo donax, Rohr-Glanzgras – Phalaris arundinacea), über die qualitativ und quantitativ noch nicht genügend Produktionsdaten verfügbar sind, um ihre Eignung als Energiepflanzen abschätzen zu können.

Schwerpunkte in der Pflanzenzüchtung

Verschiedene Pflanzen wie z.B. *Jatropha*, Rutenhirse, Chinaschilf und Pappel, die in den letzten Jahren für die Bioenergieproduktion interessant wurden, sind nicht domestiziert. Das heisst, sie wurden nicht während Jahrhunderten oder Jahrtausenden durch Züchtung zur Produktion von Biomasse genetisch adaptiert und optimiert. Hier liegt ein großes Potenzial für die Steigerung der Biomasseproduktion, das die Agrarindustrie mit großen finanziellen Mitteln und teilweise auch gentechnologischer Forschung auslotet.

Gerade für tropische Nahrungs- und Energiepflanzen (Cassava, Ölpalme, Zuckerrohr) sind allerdings die finanziellen Ressourcen für die Forschung

begrenzt, weil der Anbau dieser Pflanzen oft kleinskalig erfolgt und sie deshalb für Investoren aus dem privaten Sektor wirtschaftlich nicht interessant sind. Um die Forschung und Entwicklung einer nachhaltigen Bioenergieproduktion in Entwicklungsländern voran zu treiben, müssen deshalb öffentliche Mittel eingesetzt werden. In vielen Regionen der Welt kann die Produktivität dieser Pflanzen mit konventionellen Mitteln stark gesteigert werden (Hybridsorten, Düngung, Krankheitsbekämpfung usw.). In den Entwicklungsländern könnten mit regional intensivierter Forschung sogar die größten Produktionssteigerungen weltweit erzielt werden. Bei der Entwicklung von gentechnisch veränderten Energiepflanzen ist die Erforschung und ein systematisches Monitoring der Auswirkungen auf die Ökosysteme (Auskreuzung, Auswilderung, Toxizität, usw.) eine Voraussetzung. Sozioökonomische Aspekte und eine Kosten-Nutzen-Abwägung des Forschungsaufwands sind v.a. dann zu beachten, wenn die erwarteten Mehrerträge oder die erwartete Stabilität der Erträge von gentechnisch veränderten Energiepflanzen nur wenig über denen angepasster Landrassen liegen.

Invasives Potenzial von Energiepflanzen

Viele Energiepflanzen besitzen ein großes invasives Potenzial (schnellwachsend, viele Samen, hohes Regenerationsvermögen). Daher muss vor einem großflächigem Anbau die Gefahr in Deutschland, Europa und global untersucht werden, welche Pflanzen welchen Schaden mit sich bringen könnten, sowohl in der Landschaft als auch im Saatgut benachbarter Flächen.

Agroforstwirtschaftliche Systeme

Agroforstwirtschaftliche Systeme, d.h. Systeme mit gleichzeitiger Wald und Grasland-Weide-Nutzung, bergen ein großes Potenzial, sowohl für den Nahrungsmittel- als auch für den Energiepflanzenanbau. Informationen über die „besten“ Mischungen und über die grundlegenden physiologischen und ökologischen Prozesse, die in solchen Systemen ablaufen, sind jedoch unzureichend. Meist wird ohne wissenschaftliches Fundament auf traditionelles Wissen zurückgegriffen. Gerade für die Zukunft, mit besonderen klimatischen Herausforderungen, ist dieses Wissen nicht ausreichend, um Ertragsstabilität und Qualität zu gewährleisten. Hier sollten gemeinsam mit internationalen Organisationen, wie z.B. der FAO, Forschungsprogramme aufgelegt werden, die Nahrungsmittel-, Futtermittel- und Energiepflanzenanbau in den Mittelpunkt stellen.

Einfluss von Klimawandel auf den Anbau von Energiepflanzen

Der Klimawandel wird alle Anbausysteme bis Mitte des Jahrhunderts stark beeinflussen. Dieser Aspekt ist in der bisherigen Diskussion um Energiepflanzenanbau kaum berücksichtigt, obwohl er den Erfolg maßgeblich beeinflussen wird. Daher sind bei zukünftigen Klimafolgen- bzw. landwirtschaftlichen Forschungsprogrammen der Einfluss von Klimawandel auf den Anbau von Energiepflanzen dringend einzubeziehen.

11.2.2 Internationale Forschungsprogramme zu nachhaltigen und ökonomischen Bioenergiepotenzialen

In vielen Entwicklungs- und Schwellenländern werden derzeit Bioenergiepolitiken und -förderstrategien entwickelt. Gleichzeitig ist aber das Wissen um die jeweiligen Potenziale unterschiedlicher Nutzungsformen von Biomasse zur Energiegewinnung, spezifische Landnutzungskonkurrenzen und Regulierungsanforderungen zur Verhinderung nicht intendierter ökologischer, sozialer und ökonomischer Effekte begrenzt. Auf Grundlage der vom WBGU erarbeiteten, differenzierten Sichtweise auf die Chancen und Risiken der Bioenergienutzung sollte die Bundesregierung in internationalen Organisationen wie etwa UNEP, Weltbank und den regionalen Entwicklungsbanken darauf hinwirken, regionale Forschungsprogramme zu nachhaltigen Potenzialen von Bioenergie in den Entwicklungsregionen aufzulegen, um Entscheidungsträgern robustere Grundlagen für langfristig orientierte Bioenergiepolitiken zu verschaffen. Die Forschungsprogramme sollten miteinander vernetzt werden, damit auch überregionale Bewertungen möglich werden. UNEP könnte als führende internationale Umweltorganisation eine Art Clearinghouse-Funktion übernehmen und die Ergebnisse zentral sammeln und bewerten, so dass Entscheidungsträger auf eine umfassende Beurteilung und den aktuellen Stand des Wissens zurückgreifen können. Die zusammengeführten Forschungsergebnisse können schließlich auch dazu beizutragen, einen internationalen Konsens für Nachhaltigkeitsstandards in der Bioenergiewirtschaft zu entwickeln. Zeitgleich sollten über die Entwicklungspolitik oder internationale Forschungskooperationen nationale Forschungsprogramme zu „Nachhaltigen Bioenergiestrategien“ insbesondere in den Ländern unterstützt werden, die laut WBGU-Potenzialanalyse zukünftig signifikante Anbieter von Biomasse aus Energiepflanzen sein könnten.

Bestimmung des ökonomisch nachhaltigen Bioenergiepotenzials

Neben der Frage, wie groß das technisch verfügbare und ökologisch nachhaltige Bioenergiepotenzial ist, muss die Frage nach dem ökonomisch rentablen und nachhaltigen Bioenergiepotenzial gestellt werden. Das im Gutachten für Energiepflanzen erarbeitete technisch nutzbare und ökologisch nachhaltige Potenzial sollte dahingehend bewertet werden, zu welchen Kosten es ausgeschöpft werden kann. Auch hier ist die Unterscheidung des Potenzials in Energiepflanzen und Abfall- bzw. Reststoffe essentiell. Für die Ermittlung des Potenzials der Energiepflanzen müssen bestehende (agrar-)ökonomische Modelle weiterentwickelt und ihre Kopplung an Klima- und Vegetationsmodelle kontinuierlich vorangetrieben werden (siehe integrierte Landnutzungsmodellierung). Für das Potenzial der Reststoffe müssen globale Stoffströme der Land- und Forstwirtschaft als auch der Abfallwirtschaft analysiert und hinsichtlich geschlossener Nährstoffkreisläufe und der Wirtschaftlichkeit der Bereitstellung von Energie aus Reststoffen bewertet werden. Als Erweiterung sollte in den ökonomischen Modellen technologischer Wandel berücksichtigt werden, um ein realistisches Bild von technologischen Weiterentwicklungen im Bereich Landnutzung und Energieeffizienz vor dem Hintergrund sich verändernder wirtschaftlicher Rahmenbedingungen zu erhalten. Neben der Verbesserung der Modelle müsste auch die Verfügbarkeit flächenbezogener ökonomischer Daten erhöht werden. Dazu sollten langfristig angelegte Datenerhebungen (z.B. Befragungen) durchgeführt und die erfassten Daten zentral gespeichert werden. Diese sollten mit den räumlich aufgelösten naturwissenschaftlichen Modellen kompatibel sein und neben demographischen und ökonomischen Daten insbesondere auch Informationen zu Landnutzungsentscheidungen und Lebensstilen enthalten. Nach Abschätzung des WBGU bewegt sich das nachhaltige Potenzial der Abfall- und Reststoffe in derselben Größenordnung wie dasjenige für Energiepflanzen. Weiterhin besteht Forschungsbedarf zu den institutionellen und strukturellen Voraussetzungen für die Ausschöpfung des ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Bioenergiepotenzials. Dabei ist für einzelne Regionen mit hohem ökonomischen Bioenergiepflanzenpotenzial zu untersuchen, welche Voraussetzungen bezüglich der Verteilung von Landrechten, Institutionen zur Durchsetzung von Eigentumsrechten sowie der Akteursstrukturen im Agrarsektor (z.B. Dominanz großer Konzerne oder zahlreiche kleine Anbieter) für die tatsächliche Realisierung des Potenzials vorteilhaft sind. Speziell für Entwicklungs- und Schwellenländer ist außerdem zu klären, inwiefern das Vorhandensein von Infrastrukturen für Lagerung, Verarbeitung, Distribution, Marketing und Export von Bioenergieträgern Voraussetzungen für die Ausschöpfung des nachhaltigen ökonomischen Bioenergiepotenzials sind und wie diese Strukturen gestaltet sein müssen, um das Potenzial in wirtschaftlich und sozial nachhaltiger Weise zu nutzen (Rosegrant et al., 2008).

Kosten und Nutzen der Bioenergienutzung

Damit die sozioökonomischen Auswirkungen und die gesamtwirtschaftliche Rentabilität der Bioenergienutzung in einer Region bewertet werden können, müssen Studien zu den regionalen (und in einem nächsten Schritt auch zu den globalen) Kosten und Nutzen von Bioenergieproduktion und -nutzung durchgeführt werden. Dabei sollten vor allem auch die Auswirkungen von Bioenergiepflanzenproduktion und -nutzung auf die Rohstoff- und Nahrungsmittelpreise, die Ernährungs- und Energiesicherheit, mögliche Klimawirkungen, das wirtschaftliche Wachstum, die Handelsbilanz und die Abhängigkeit von Ölimporten untersucht werden. In diesem Zusammenhang sollten auch Verteilungsaspekte berücksichtigt werden, da Kosten und Nutzen unter den Akteuren sehr unterschiedlich verteilt sein können. Es sollten primär Fragen gestellt werden, wer die Gewinner und Verlierer verschiedener Bioenergiestrategien (z.B. kleinskalige, dezentrale Produktion und Nutzung oder großskaliger, exportorientierter Energiepflanzenanbau) sind und unter welchen Umständen (bezüglich Produktion, Marketing, Distribution usw.) verschiedene Bevölkerungsgruppen (u.a. Großgrundbesitzer, Kleinbauern, ländliche Arbeiter, urbane Bevölkerung) vom Energiepflanzenanbau profitieren oder verlieren können. Des weiteren ist zu klären, in welchen Branchen Reststoffe sinnvoll für energetische Zwecke genutzt werden können und Produkte so gestaltet werden, dass sie zuerst stofflich und anschließend energetisch genutzt werden können (Stichwort Kaskadennutzung). Auf dieser Grundlage ist zu untersuchen, mit welchen Politikmaßnahmen ein Ausgleich zwischen Gewinnern und Verlierern von Bioenergienutzung geschaffen werden kann.

Einen ersten methodischen Ansatz zur Abschätzung von Kosten und Nutzen der Energiepflanzennutzung für einzelne Länder und Regionen bildet das “Bioenergy Assessment-Tool” von der FAO, dem Copernicus Institut der Universität Utrecht und dem Ökoinstitut. Mit Hilfe dieses analytischen Rahmenwerkes, dem das partialanalytische ökonomische Modell COSIMO der FAO in Verbindung mit dem QUICKSCAN-Modell des Copernicus-Instituts zugrunde liegt, wird eine Basis geschaffen, die Wirkungen von Energiepflanzennutzung auf makroökonomische Größen, auf die Einkommenssituation

einzelner Haushalte, auf die Preisentwicklung sowie auf die Folgen für die Ernährungssicherheit umfassender zu bewerten. Die Methodik wird derzeit in Peru, Thailand und Tansania getestet (FAO, 2008e). Ähnliche Ansätze zur Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen der Bioenergienutzung sollten für Reststoffe entwickelt und für beide Formen, Energiepflanzen und Reststoffe, verfeinert werden, damit künftig zuverlässigere Ergebnisse generiert werden können.

11.2.3 Soziale Nachhaltigkeit

Vorliegende Fallstudien (Altenburg et al., 2008; van Eijck und Romijjn, 2008; UNEP, 2007b) legen nahe, dass das wirtschaftlich und insbesondere das sozial nachhaltige Entwicklungspotenzial nicht nur von naturräumlichen Bedingungen, der jeweiligen Energiepflanze und Anbaumethoden abhängt, sondern insbesondere beim großskaligen Anbau auch von den politischen und sozioökonomischen Bedingungen sowie den Partizipationsmöglichkeiten der lokalen Bevölkerung.

Der Anbau von Energiepflanzen (z.B. *Jatropha*) auf marginalen und degradierten Böden in Entwicklungsländern ist zunächst eine attraktive Option, um Konkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion zu reduzieren. Oft werden diese marginalen Flächen jedoch bereits genutzt (meist von Bevölkerungsgruppen ohne Eigentumstitel), so dass Nutzungskonflikte entstehen. Daher ist Forschung zu den Fragen notwendig, welche Maßnahmen ergriffen werden müssen und welche Entscheidungsstrukturen geeignet sind, um marginales oder degradiertes Land für den Anbau von Energiepflanzen zu nutzen, ohne dass ländliche, arme Bevölkerungsgruppen ihre Wirtschaftsgrundlage verlieren bzw. wie sie in die Verwertungskette einbezogen werden können. Dabei geht es um die Konzipierung von Anreizmechanismen ebenso wie um institutionelle Voraussetzungen (u.a. Fragen der Zuständigkeiten zwischen Gebietskörperschaften und zu Landeigentumsverhältnissen).

11.3 Bioenergie und Energiesysteme (modern, traditionell)

Aus den Ergebnissen der Bewertung verschiedener Bioenergienutzungspfade können wesentliche Schlüsse gezogen werden: Die Nutzung von Reststoffen und biogenen Abfällen , der Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung und die Herstellung von Biomethan mit Speicherung des abgetrennten Kohlendioxides, sind aus Sicht des Klimaschutzes attraktive Optionen, die weiter entwickelt werden sollten. Zudem muss die strategische Einbindung von Bioenergie in die künftigen Energiesysteme vor allem im Hinblick auf die stabilisierende Wirkung von Biomasse in elektrischen Systemen untersucht werden. Weiter kann Forschung helfen, die traditionelle Biomassenutzung vor allem in Entwicklungsländern wesentlich effizienter zu gestalten.

11.3.1 Technologien der Bioenergienutzung

Bessere Integration von Bioenergie in Energieversorgungsstrukturen

Bei steigenden Anteilen von erneuerbaren Energien wie Wind- und Solarstrom bekommt ein effektives Energiemanagement zur Bereitstellung von Regelenergie eine immer größere Bedeutung. Bioenergie ist wie fossile Energie zeitlich flexibel einsetzbar und nimmt daher eine Sonderrolle unter den erneuerbaren Energien ein. Die optimale Einbindung von Bioenergiesystemen in Versorgungsnetze sollte deshalb ein Schwerpunkt zukünftiger Forschungsanstrengungen sein. Ein viel versprechender Ansatz ist die Entwicklung und Verbreitung von kleinen mit Biomethan betriebenen KWK-Anlagen für Haushalte, die flexibel auf den aktuellen Strombedarf reagieren und in Form von virtuellen Kraftwerken das elektrische Netz mit hoher Dynamik stabilisieren können. Die Entwicklung dynamischer Systemanalysen des Stromsystems mit verschiedenen Bioenergievarianten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisung ist notwendig, um den optimalen Platz für Bioenergie in ihrer stabilisierenden Rolle im Energiesystem zu finden. Dazu gehören auch Bedarfsprognosen für Biostrom und Prognosen für die Jahreszeit-abhängige Verfügbarkeit von Bioenergie.

Höhere Brennstoffnutzungsgrade durch KWK oder das Polygeneration-Konzept

Technische Systeme mit Kraft-Wärme- oder Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (*Polygeneration*) erlauben die höchsten Brennstoffnutzungsgrade und nutzen so den knappen Rohstoff Biomasse optimal. Besonders die gleichzeitige Erzeugung von Strom, Wärme und Kälte über thermochemische oder biochemische Wandlungsverfahren ist vielversprechend und sollte weiter vorangetrieben werden.

Ein Schwachpunkt in der bisherigen Technologieentwicklung sind dezentrale KWK-Anlagen kleiner Leistung für feste, holzartige Biomasse. Besonders in der Land- und Forstwirtschaft fallen große Mengen an holzartigen Reststoffen an, die bislang dezen-

tral nur zur Wärmeerzeugung genutzt werden können. In Zukunft erhöht sich jedoch der Anteil von dezentralen regenerativen Anlagen (z.B. Windturbinen und *Photovoltaikanlagen*), wodurch der Bedarf an Regelenergie in den Verteilnetzen steigt. Neben Biogasanlagen können auch Verbrennungsanlagen in Verbindung mit einem Dampfkraftprozess (z.B. *Organic Rankine Cycle (ORC)-Anlagen*) als kleine Kraft-Wärmekopplungsanlagen für den Ausgleich der fluktuierenden Erzeugung aus Sonne und Wind eingesetzt werden. Bisher sind jedoch Anlagen zur Biomasseverstromung nicht für diese Regelungsfunktion ausgelegt.Entsprechende Forschungsprogramme können deshalb helfen, diese Defizite zu beseitigen.

Einbindung von Biomethan als universeller Energieträger in das Erdgasnetz

Biomethan kann universell in allen Energiesektoren zur Strom- und Wärmebereitstellung als auch im Verkehr eingesetzt werden. Als Bioenergieträger ist es leicht transportierbar und gut im Erdgasnetz sowohl an dezentrale Nutzer verteilbar oder an zentrale Verbraucher wie z.B GuD-Kraftwerke sammelbar. Durch die angewandten Aufbereitungsverfahren verfügt Biomethan über sehr geringe Schwefelfrachten, was sich positiv auf die beim Konversionsprozess auftretenden Emissionen auswirkt. Derzeit sind mehrere Absorptions- und Adsorptionsverfahren zur Biogasaufbereitung für kleinskalige dezentrale Anwendungen am Markt verfügbar. Forschungsbedarf besteht insbesondere im Hinblick auf den spezifischen Energieverbrauch und THG-Emissionen während des Aufbereitungsprozesses. Hoher Forschungsbedarf besteht bei bisher noch nicht für diesen Anwendungsfall etablierten Verfahren, wie Membrantrenn- und Tieftemperaturverfahren. Letztere weisen den Vorteil auf, dass CO_2 als „Abfallprodukt“ des Aufbereitungsprozesses zum einen hochrein und zum anderen verflüssigt vorliegt, was hilfreich für den Transport und die weitere Verwendung des Kohlendioxides ist. In der Entwicklung von Verfahren zur sicheren Deponierung des beim Aufbereitungsprozess abgeschiedenen CO_2 besteht ebenfalls großer Forschungsbedarf.

Die dezentralen Anlagen müssen in die bestehenden Gasnetze integriert werden und die Gasqualität der von Erdgas entsprechen, um den sicheren Betrieb von Gasnetzen und –Verbrauchern zu gewährleisten und den abrechnungstechnischen Anforderungen gerecht zu werden. Da die Anzahl von Anlagen zur Netzeinspeisung von Biomethan rasch zunimmt, besteht ein dringender Forschungsbedarf hinsichtlich der Integration von Biomethan in die Netze. Dazu gehört auch die Entwicklung von Energiemanagementstrategien, bei denen die Dynamiken der Gas-, Strom- und Wärmenetze übergreifend betrachtet werden.

Anpassung der Verbrennungs- und Vergasungstechnologie an Biomasse

Da der Rohstoff Biomasse sehr vielfältig ist und seine Brennstoffeigenschaften nicht so homogen wie fossiler Brennstoffe sind, muss die Verfahrenstechnik so entwickelt werden, dass die Nutzung von Biomasse möglichst geringe Schadstoffemissionen aufweist.

Die Verbrennungs- und Vergasungsverfahren müssen so entwickelt werden, dass eine breite Rohstoffbasis problemlos eingesetzt werden kann. Die Umwandlung von Biomasse in den Sekundärenergieträger Synthesegas ermöglicht eine hohe Flexibilität für die Verwendung der Biomasse, da neben Strom und Wärme auch Kraftstoffe wie Fischer-Tropsch-Diesel, Wasserstoff und Biomethan hergestellt werden können. Vergasungsverfahren für Biomasse-Ausgangsstoffe unterschiedlicher Zusammensetzung stellen daher ein wichtiges Forschungsthema dar.

Bioraffinerien mit flexiblem Einsatz für energetische oder stoffliche Produkte

In absehbarer Zukunft wird der Rohstoff Erdöl zum knappen Gut. Besonders die chemische Industrie braucht ein Substitut für Erdöl. Anders als Energiedienstleistungen, die auch aus weiteren Energiequellen wie Wind-, Wasser- und Solarenergie erbracht werden können, ist die chemische Industrie von organischen Rohstoffen abhängig. Bioraffinerien, die heute zur Herstellung von Biomethan oder synthetischem Diesel entwickelt werden, sollten so ausgelegt werden, dass sie später, wenn sich im Verkehr die Elektromobilität etabliert hat, Rohstoffe für die chemische Industrie aus Biomasse bereitstellen können. Ein besonderer Forschungsschwerpunkt sollte deshalb bei der Gasreinigung und –aufbereitung liegen. Ebenso wie Reststoffe stellen Algen als Biomasse keine Nahrungskonkurrenz dar. Algen benötigen wenig Wasser und können auch in ariden Gebieten wie Wüsten gezüchtet werden. Erste Experimente deuten auf ein erhebliches Potenzial für die stoffliche und energetische Nutzung hin. Deshalb sollte auch hier ein Forschungs-Schwerpunkt gebildet werden.

11.3.2 Potenzial der energetischen Nutzung von Abfall- und Reststoffen

Verschiedene Studien zeigen, dass das technische Potenzial für die Nutzung von Bioenergie aus Abfall- und Reststoffen (hierzu zählen Pflanzenreste aus der

Land- und Forstwirtschaft, Dung und organische Abfälle) in einer Größenordnung von etwa 90 EJ pro Jahr liegt (Kap. 6). Dabei ist allerdings noch weitgehend unklar, welcher Anteil dieses technischen Potenzials sich in nachhaltiger Weise und ökonomisch rentabel nutzen lässt. So spielt Tot- und Restholz im ökologischen Gefüge eines natürlichen oder naturnahen Waldes eine wichtige Rolle. Ebenso sind Pflanzenreste für den Nährstoffhaushalt der Böden von großer Bedeutung. Bei allen Reststoffquellen erscheint zudem unklar, ob die Nutzung von oft räumlich verteilt auftretenden kleineren Mengen von Biomasse praktikabel ist. Nur wenige Studien decken bisher dieses im Hinblick auf einen energetischen Beitrag unterschätzte Themenfeld ab.

Daher besteht genereller Forschungsbedarf zur Frage, in welchem Umfang und auf welche Weise sich organische Reststoffe nachhaltig und ökonomisch nutzen lassen. Dies umfasst ökologische Forschung zur Bedeutung der Reststoffe für die Biodiversität und den Boden- sowie Klimaschutz für unterschiedliche genutzte Wälder und Äcker in verschiedenen Klimazonen ebenso wie Forschung zur benötigten Infrastruktur sowie zur ökonomischen und technisch sinnvollen Einbindung dieses Potenzials in globale Energiesysteme.

11.3.3 Modernisierung traditioneller Bioenergienutzung zur Überwindung der Energiearmut

Die Bioenergie verfügt über ein großes Potenzial zur Minderung der weltweiten Energiearmut, von der weltweit 2,5 Mrd. Menschen betroffen sind, und der THG-Emissionen, wenn die Effizienz der traditionellen Biomassenutzung in Entwicklungsländern signifikant und breitenwirksam verbessert würde. Die dazu notwendigen Technologien (z.B. verbesserte Holzherde, Reststoff basierter Biogasanlagen) sind verfügbar und weltweit sind viele entwicklungspolitische Maßnahmen in diesem Bereich umgesetzt worden. Die Wirkungen dieser Anstrengungen bleiben dennoch begrenzt. Die Zahl der „energiearmen“ Menschen ist nicht signifikant gesunken, obwohl es sich um verhältnismäßig einfache und kostengünstige Technologien handelt. Zwar existieren viele Einzelevaluierungen zu entwicklungspolitischen Projekten und Programmen zur Bekämpfung der Energiearmut, dennoch liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor, warum in diesem Bereich keine Durchbrüche erzielt werden konnten. Daher besteht Forschungsbedarf darüber, welche kulturellen, institutionellen, eigentumsrechtlichen und wirtschaftlichen Faktoren Effizienzsteigerungen bei der traditionellen Bioenergienutzung in Entwicklungsländern durch die einfache Modernisierung der Technologie begünstigen oder erschweren.

11.3.4 Integrierte Technologieentwicklung und -bewertung zur Bioenergie

Bisher berücksichtigt die ingenieurwissenschaftliche Forschung bei der Entwicklung neuer Bioenergietechnologien sozioökonomische Fragen (wirtschaftliche Rentabilität der neuen Technologie unter verschiedenen Rahmenbedingungen, möglicher Anwenderkreis und dessen Ansprüche, wirtschaftliche und soziale Nachhaltigkeit) nur am Rande. Die sozioökonomischen Rahmenbedingungen sind jedoch ganz wesentliche Einflussgrößen für die erfolgreiche Adaptation neuer Bioenergietechnologien (Kap. 11.3.1 und 11.3.4). Zudem ist die Technologiebewertung durch Sozialwissenschaftler erforderlich, um den Einfluss neuer Bioenergietechnologien auf die Konkurrenz zwischen Energie-, Nahrungs- und Futtermittelproduktion abschätzen zu können und zu bewerten, welche Stellung die Technologie innerhalb eines effizienten, zukunftsweisenden Energiemix einnehmen kann. Derzeit besteht in der Forschungs- und Ausbildungslandschaft in Deutschland ein eindeutiges Defizit bei der integrierten Technologieentwicklung und -bewertung.

Deshalb sollten durch die Förderaktivitäten des BMBF wie z.B. „BioEnergie 2021 – Forschung für die Nutzung von Biomasse“ auch Projekte unterstützt werden, in denen eine integrierte Entwicklung und Bewertung neuer Bioenergietechnologien durch Ingenieur- und Sozialwissenschaftler vorgesehen ist. Wichtig wäre es, Forschungsschwerpunkte zu schaffen, in denen Wissenschaftler die Verknüpfung von natur-, ingenieur- und sozialwissenschaftlichen Ansätzen von Anfang an in ihrem Forschungsauftrag umsetzen. Darüber hinaus sollten in interdisziplinären sozial- und ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen zu Bioenergietechnologien Nachwuchskräfte speziell für die Schnittstelle zwischen Technologieentwicklung und -bewertung ausgebildet werden, etwa ähnlich wie im Masterstudiengang „Bioenergy Technology“ der Technischen Universität Lapeenranta in Finnland (LUT, 2008) oder im Bachelorstudiengang „Nachwachsende Rohstoffe und Bioenergie“ der Universität Hohenheim (Universität Hohenheim, 2008). Wegweisend ist auch das Begleitstudium „Concentration in Environmental Sustainability (ConsEnSus)“, das die Universität Michigan für ingenieurwissenschaftliche Studiengänge anbietet. Im Rahmen dieser Vertiefung werden den Ingenieuren neben juristischen und ökonomischen Kenntnissen auch Methoden zur Bewertung von

Umweltwirkungen vermittelt (Universität Michigan, 2008). Im Bereich der integrierten Forschung kann das „Renewable and Appropriate Energy Laboratory“ (RAEL) der Universität Berkeley als Beispiel dienen (UC Berkeley, 2008).

11.4 Bioenergie und globales Landnutzungsmanagement

11.4.1 Datenbasis für globale Landnutzung und Degradation

Die Hauptinformationsquelle für die aktuelle Landbedeckung und ihre Veränderung sind Satellite-Fernerkundungsdaten. Doch nicht alle Arten des Bodenzustands oder der Landnutzung können mit Hilfe von Satellitendaten erkannt werden. So werden beispielsweise in vielen Ländern die Ackerflächen nach der Ernte auch für Beweidung genutzt. Ähnliches gilt für scheinbar ungenutzte Brachflächen, die von der lokalen Bevölkerung als Weidefläche für Vieh oder zur Sammlung von Brennholz verwendet werden. Da angesichts des Nahrungsmittelbedarfs einer wachsenden Weltbevölkerung und des zunehmenden Einsatzes von Bioenergie eine möglichst effiziente Nutzung der global zur Verfügung stehenden Flächen unabdingbar ist, müssen die wissenschaftlichen Grundlagen für den Aufbau eines globalen GIS-gestützten Landkatasters geschaffen werden, bei dem Satellitendaten zur Landnutzung mit lokalen Informationen abgeglichen und ergänzt werden.

Zwei grundlegende Faktoren für eine nachhaltige landwirtschaftliche Produktion sind ein gutes Wasser- und Bodenmanagement. Eine effiziente Wassernutzung erfordert eine auf die lokale Wasserverfügbarkeit abgestimmte Strategie mit optimierten Produktionsabläufen (z.B. Mehrfachnutzung von (Ab-)Wässern, effiziente Regenwasserspeicherung usw.). Dazu müssen die Wasserressourcen kartiert, meteorologische Lokaldaten verfügbar gemacht und die Wasserqualität mittels Indikatorensystem erfasst und überwacht werden können.

Was die Qualität und Degradation der Böden betrifft, ist die Datengrundlage auf globaler Ebene stark veraltet und zum Teil auf nationaler Ebene nicht verfügbar. Die einzige Studie zur Klassifizierung der weltweiten Bodendegradation GLASOD datiert von 1990–1992 (Region Südasien: ASSOD-Studie von 1995–1997). Neben GLASOD gibt es die neue Initiative GLADA (Bai et al., 2008). Während GLASOD auf Abschätzungen und Expertenmeinungen beruht, schätzt GLADA Bodendegradation über die Nettoprimärproduktion (NPP) aus Fernerkundungsdaten ab. Daher besteht eine dringliche Aufgabe zur Umsetzung einer nachhaltigen Landnutzungsstrategie darin Bodentypen und deren Zustände aktuell und mit direkten Messungen zu erfassen. Diese Aktivitäten sollten in Zusammenarbeit mit der FAO erfolgen. Gerade im Hinblick der Ressourcenknappheit an verfügbarer landwirtschaftlicher Fläche ist es besonders wichtig, den Zustand und die Ausbreitung degradierter Böden zu kennen, da hier ein großes Potenzial für eine nachhaltige Produktion von Biomasse mit gleichzeitiger Option zur Bodenverbesserung, C-Sequestrierung und ökologischen Aufwertung liegt. Weiterhin sollten Forschungsarbeiten zu marginalen Böden unterstützt werden, die sich mit ihrer Ausdehnung, den Gründen für ihre Degradation, möglichen Abhilfemaßnahmen und ihren potenziellen Erträgen beschäftigen.

11.4.2 Integrierte naturwissenschaftliche und ökonomische Landnutzungsmodellierung

Zur Bestimmung des technisch verfügbaren, ökologisch nachhaltigen und wirtschaftlichen Bioenergiepotenzials wird eine verbesserte integrierte Modellierung ökonomischer und naturwissenschaftlicher Prozesse der Landnutzung benötigt. Dabei ergeben sich verschiedenste Herausforderungen, da die bestehenden naturwissenschaftlichen und (agrar-)ökonomischen Modelle hinsichtlich der Zeitskalen, der räumlichen Auflösung sowie der thematischen Ausrichtungen häufig nicht kompatibel sind. Die Verbindung der Modelle ist jedoch unerlässlich, um Rückkopplungseffekte zwischen dem biologisch-physikalischen und dem sozialen System adäquat abbilden zu können. Es geht also darum, im Forschungsverbund aus Natur- und Sozialwissenschaftlern die Kopplung dieser Modelle voranzubringen.

Regionale Modelle sollten außerdem soweit möglich miteinander vernetzt werden, damit interregionale Dependenzen abgebildet werden können. Die Dynamisierung der Modelle sollte zudem weiterentwickelt werden. Weiterhin sollten den Modellen vereinheitlichte Szenariensätze, Modellierungsannahmen und Datensätze zugrunde gelegt werden. Dadurch können verschiedene globale und regionale Modellierungen besser integriert werden und Vergleiche zwischen Modellergebnissen sind eher möglich. Die zu erwartenden Zielkonflikte in der Landnutzung (z.B. zwischen der Bereitstellung verschiedener agrarischer Güter und verschiedener Ökosystemdienstleistungen) könnten so ebenfalls bewertet werden.

11.4.3
Akteure und Treiber, sowie Gesamteffekte aus Einzelentscheidungen auf die Landnutzung

Bisherige Kenntnisse zu den wichtigen Akteuren und Treibern von lokalen, regionalen und globalen Landnutzungsänderungen müssen weiter spezifiziert werden, ebenso wie die Faktoren, die die Entscheidungen der einzelnen Akteure beeinflussen (einzelwirtschaftliche Interessen, soziale und kulturelle Einflüsse, politische Ökonomie, soziale Dynamiken usw.). Die Rolle unterschiedlicher Lebensstile (z.B. Verzehr tierischer Lebensmittel) sowie die Effekte von Technologieentwicklung (bezüglich Ertragssteigerungen bei der Rohstofferzeugung aber auch bezüglich größerer Effizienz in der Rohstoffnutzung) auf die Landnutzung sollten dabei ebenfalls berücksichtigt werden.

Es sollte analysiert werden, welche Gesamteffekte von der Summe der Einzelentscheidungen auf die Landnutzung ausgehen. Dazu sollten Methoden wie z.B. Agent-based Modelling angewendet und weiterentwickelt werden. Die Kenntnis der Wirkung kollektiver Entscheidungsprozesse und sozialer Dynamiken ist dabei eine wichtige Voraussetzung, um Regulierungs- und Steuerungsinstrumente wirkungsvoll einsetzen zu können.

Das Wissen um Kausalitäten und Treiber von Landnutzungsmustern sollte schließlich genutzt werden, um Landnutzung so zu steuern, so dass die sozialen und ökologischen Leitplanken eingehalten werden. Für die „Steuerung“ von Landnutzung müssen geeignete Institutionen und Mechanismen identifiziert werden, mit denen Einzelentscheidungen koordiniert werden können, um gewünschte Landnutzungsmuster zu erreichen. In diesem Zusammenhang steht auch der Forschungsbedarf zur Steuerungswirkung von Standards und Zertifizierungssystemen (für land- und forstwirtschaftliche Produkte) sowie von umweltökonomischen Instrumenten (wie z.B. Zahlungen für Umweltleistungen oder Emissionshandelssysteme) auf die Landnutzung und unter welchen Bedingungen diese Instrumente ihre größte Steuerungswirkung entfalten.

11.4.4
Wechselwirkungen zwischen Energiepflanzenanbau und Ernährungssicherung

Die Ursachen für die in letzter Zeit zu beobachtenden Anstiege der Nahrungsmittelpreise müssen weiter untersucht werden. Insbesondere ist die Frage zu klären, welche Rolle dabei der Nachfrage nach Bioenergie zukommt. Bisherige Schätzungen zum Einfluss der Nachfrage nach Biokraftstoffen auf die Nahrungsmittelpreise weisen sehr unterschiedliche Ergebnisse aus. Solche sehr unterschiedlichen Schätzungen sind auf die Verwendung unterschiedlicher Modelle und Annahmen zurückzuführen; eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Schätzungen ist nicht gegeben. Für Entscheidungsträger ist dies eine äußerst missliche Lage: Auf welche Schätzungen sollen sie sich stützen, wenn es etwa um die Beurteilung der Förderungswürdigkeit von Biokraftstoffen geht? Es wäre hier wichtig, zunächst einmal für Transparenz zu sorgen und die verschiedenen Modelle und Annahmen in Meta-Studien miteinander zu vergleichen. Auf dieser Basis kann dann die Relevanz der verschiedenen Modelle und Annahmen für bestimmte Kontexte beurteilt werden, und es können Prognosen für die künftige Entwicklung der Agrarmärkte und die künftige Bedeutung von Biokraftstoffen bzw. ganz generell von Bioenergie für die Verfügbarkeit und die Preise von Nahrungsmitteln abgegeben werden. Auf dieser Grundlage können notwendige regulierende Maßnahmen für Biokraftstoffe bzw. für Bioenergie seriös identifiziert werden.

11.4.5
Wirkungen veränderter Ernährungsmuster und Lebensstile auf Klima und Landnutzung

Die vorhandenen Daten legen nahe, dass Ernährungsgewohnheiten (z.B. der Anteil von Fleisch und Milchprodukten an der Ernährung) einen großen Einfluss auf die Klimabilanz und auf die erforderliche Landfläche haben. Dieser Zusammenhang sollte für unterschiedliche Kulturkreise und Regionen genauer untersucht werden, auch im Hinblick auf beobachtete zeitliche Trends (z.B. wachsender Fleischkonsum in Schwellenländern) und auf mögliche Verbesserungen (Optionen für einen bewussten Lebensstil als Win-win-Situation mit gesundheitlichen Vorteilen, einer verbesserten Klimabilanz und weniger Flächenbedarf). Komplette Ökobilanzen („vom Acker bis zum Teller“) liegen bislang nur für wenige Lebensmittel vor. Dazu sind Untersuchungen zu Konsumentenverhalten hinsichtlich Nahrungsmittel- und Energiepflanzen-Konsum mit und ohne Label, z.B. zum Nachfrage- und Preisgefüge, Informationsbedürfnis usw. notwendig.

Indikatoren wie der „Ökologische Fußabdruck pro Kopf und Jahr“ verdeutlichen den Einfluss, den der Mensch durch seine Konsumansprüche auf Landoberfläche und Biosphäre ausübt. Dabei geht es vor allem um die Nachfrage nach Nahrungsmitteln, die flächenintensiv produziert werden (Fleisch- und Milchprodukte). Sie verstärkt Landnutzungskonkurrenzen und Ressourcenknappheit. Gelänge es, einen wirksamen gesellschaftlichen Wandel zu induzieren,

hin zu Lebensstilen und Konsummustern, die mit einer nachhaltigen Landnutzung konform gingen, dann könnte der Nutzungsdruck auf die Biosphäre gemildert werden. Es besteht weiterhin Forschungsbedarf zu geeigneten Instrumenten, um Ernährungsmuster entsprechend zu verändern. Neben „weichen" Maßnahmen (Bildung, Aufklärung, Kennzeichnungspflichten) sollten auch die Wirkungen stärker eingreifender Instrumente (z.B. Subventionen, Verbrauchsteuern) in die Forschung einbezogen werden. Ebenso muss die Forschung zu den gesellschaftlichen Perspektiven und (ethischen) Grenzen einer staatlichen Beeinflussung von Konsummustern vertieft werden. Für die Bewertung und Diskussion dieser Fragen muss auch weiterhin zu einer robusten Datenbasis und zu einem eindeutigen Zurechnungsverfahren von individuellem bzw. nationalem Flächenverbrauch geforscht werden.

11.5 Gestaltung internationaler Bioenergiepolitik

11.5.1 Management der globalen Landnutzung

Es ist absehbar, dass sich die Landnutzungskonkurrenzen in globalem Maßstab verschärfen werden. Um die daraus erwachsenden Herausforderungen zu bewältigen, bedarf es belastbarer Informationen über die Entwicklung globaler Landnutzungsmuster nicht nur in Abhängigkeit klimatischer, sondern auch sozioökonomischer und politischer Entwicklungen. Die interdisziplinäre Forschung zu globalen und regionalen Landnutzungsmodellen und -szenarien sollte folglich intensiviert werden (siehe integrierte Verbundforschung).

Momentan wird die globale Landnutzung wesentlich durch den Markt und nationale Politiken bestimmt. Angesichts der zunehmenden Landnutzungskonkurrenzen empfiehlt der WBGU, verstärkt die Möglichkeiten einer Lenkung der Landnutzung zu erforschen. Dabei geht es zum einen um indirekte Wirkungen, die durch zahlreiche internationale Vereinbarungen und Instrumente auf die globale Allokation von Boden ausgehen. Zum anderen geht es um die Frage, ob Mechanismen und Instrumente der lokalen und nationalen Raumplanung weiterentwickelt und auf die globale Ebene übertragen werden können und sollten. Internationale Kommunikations-, Berichts- und Monitoringpflichten sowie Landnutzungsprinzipen sind derzeit wesentliche Politikinstrumente. Vereinzelt existieren außerdem zwischenstaatliche Flächennutzungsvereinbarungen, wie z.B. die internationale Verpflichtung zur Einrichtung von Schutzgebieten im Bereich des Naturschutzes. Eine zentrale Forschungsfrage ist in diesem Zusammenhang, inwieweit Flächennutzungsvereinbarungen in darüber hinausgehenden Landnutzungssektoren eine Rolle spielen könnten und wie eine konsistente Gesamtabstimmung sektorspezifischer Flächennutzungsvereinbarungen erfolgen kann. Dabei sind die Effektivität, Effizienz, Praktikabilität und Durchsetzbarkeit internationaler Raumplanungsinstrumente zu bewerten, ihre wirtschaftlichen Verteilungswirkungen abzuschätzen und ihr Einfluss auf die Strukturen der internationalen Arbeitsteilung zu analysieren. Entwicklungspolitische und geostrategische Aspekte wären dabei von der Forschung mit zu beachten.

11.5.2 Standardsetzung und WTO-rechtliche Rahmenbedingungen

Rahmen für Standardsetzung und Nachhaltigkeitskriterien

Aus rechtlicher Sicht besteht Klärungsbedarf zur Frage, welches völkerrechtliche Regime am besten geeignet ist, um Nachhaltigkeitskriterien in Bezug auf Produktion und Nutzung von Bioenergie aufzunehmen. Um hier zu präziseren Aussagen zu gelangen, sollte eine umfassende Abklärung der Vor- und Nachteile verschiedener denkbarer Vorgehensweisen vorgenommen werden. Dabei ist der Ansatz eines eigenständigen multilateralen Abkommens ebenso in die Überlegungen einzubeziehen wie eine mögliche Angliederung an eine der bestehenden multilateralen Abkommen (insbesondere Biodiversitätskonvention und Klimaschutzkonvention, schwieriger Desertifikationskonvention). Weiter stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, welche Methoden der Formulierung von Nachhaltigkeitskriterien für Bioenergie im jeweiligen multilateralen Rahmen am geeignetsten sind. Durch die Entwicklung einer multilateralen „Musterkonvention" in Bezug auf Nachhaltigkeitsstandards für Bioenergie ließe sich das Potenzial für entsprechende Regelungen überprüfen und deren Einbettung in den bestehenden Rechtsbestand – nicht zuletzt auch im Hinblick auf die Vereinbarkeit mit dem WTO-Regime – durchspielen.

Präzisierung und Konkretisierung des WTO-rechtlichen Rahmens

Das WTO-Regime befindet sich in fortlaufender Entwicklung (andauernde Verhandlungsrunde; Praxis der Streitschlichtungsorgane). Die Verhandlungsergebnisse sollten politik- und rechtswissenschaftlich mit dem Ziel begleitet werden, deren Auswirkungen auf die Verwirklichung nachhaltiger Bioenergiepro-

duktion laufend zu analysieren und entsprechenden Handlungsbedarf auf den verschiedenen Ebenen rechtlicher Regulierung (international, supranational, national) frühzeitig zu erkennen. Besondere Beachtung ist dabei der Entwicklung von Mindestanforderungen für die Anerkennung von Bioenergieträgern als „Environmental Goods“ zu widmen.

11.5.3 Bioenergiepolitik und Sicherheitspolitik

Energiesicherheit ist zu einem zentralen Gegenstand der internationalen Politik geworden. Bioenergie ist ein Baustein für nationale, regionale und internationale Energiesicherheit. Der Wettbewerb um den Zugang zu Biomasse wird daher zukünftig, ähnlich wie die Konkurrenz um den Zugang zu Öl und Gas, zunehmen. Die Dynamik der Entwicklung der Bioenergiewirtschaft und die sich herausbildenden Muster internationaler Arbeitsteilung werden daher geopolitische Auswirkungen haben und könnten neue Spannungslinien in der internationalen Politik befördern. Die sicherheitspolitische Forschung sollte diese Aspekte in ihren Analysen zu den Risiken von Ressourcenkonflikten berücksichtigen.

11.5.4 Weiterentwicklung der Verpflichtungsregime unter UNFCCC und CBD

Austauschbarkeit von Emissionsrechten bei sektoralen Zielen

Der WBGU schlägt für ein Post-2012 Regime unter der UNFCCC sektorale Teilregimes mit getrennten Zielvereinbarungen für Emissionsreduktionen vor, d.h. Ziele für den (globalen) LULUCF-Sektor sowie den (globalen) Nicht-LULUCF-Sektor (WBGU, 2003b). Dabei ist eine gewisse Austauschbarkeit von Emissionsrechten aus beiden Teilregimes vorstellbar, um die Effizienz zu erhöhen und die Liquidität im globalen Kohlenstoffmarkt zu stützen und damit dessen Funktionsfähigkeit zu verbessern, ohne gleichzeitig die ökologische Integrität des gesamten Verpflichtungsregimes zu beschädigen (Kap. 6.4). Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Ausgestaltung der Austauschbarkeit: Inwieweit bzw. bis zu welcher Höhe sollte die Austauschbarkeit von Emissionsrechten begrenzt werden? Welche Anreiz- und Verteilungswirkungen ergeben sich aus alternativen Ausgestaltungen? Und welche Folgerungen ergeben sich daraus für die politische und administrative Durchführbarkeit?

Abstimmung der Finanzierung von vermiedener Entwaldung und von Schutzgebietsnetzen

Um Erfolge bei den Anstrengungen zur Vermeidung von Emissionen durch Entwaldung (REDD) unter dem Dach der Klimarahmenkonvention zu erzielen, sollten verlässliche Vereinbarungen über die an die waldreichen Länder zu leistenden Zahlungen getroffen werden (Kap. 9.3). Von dem Schutz der Senken bzw. Kohlenstoffvorräte können positive Effekte für den Erhalt von Biodiversität, und hier vor allem für Schutzgebiete, ausgehen und umgekehrt. Auch zur Finanzierung eines globalen Schutzgebietsnetzes unter der CBD bedarf es verbindlicherer Regelungen, um eine ausreichende Mobilisierung finanzieller Mittel für diesen Zweck zu gewährleisten (Kap. 9.5). Vor diesem Hintergrund eröffnen sich eine Reihe von Forschungsfragen zu den Synergien zwischen den Verpflichtungen unter den beiden Regimen, einerseits zur Definition dieser Synergien, andererseits zu Regelungsoptionen bezüglich der gegenseitigen Anrechung von Zahlungen zwischen den beiden Regimen (Doppelzählung bzw. Teilanrechnung der Zahlungen auf Verpflichtungen in beiden Regimen, exklusive Anrechnung von Zahlungen auf Verpflichtungen in einem Regime). Die Anreiz- und Verteilungswirkungen der einzelnen Kriterien zur Bewertung von Synergieeffekten und der Regelungsoptionen sollten eingehend analysiert werden. Ebenso sollte die politische Durchführbarkeit und Praktikabilität der verschiedenen Optionen bewertet werden, , z.B. die Entwicklung eines Schutzgebietsprotokolls zur CBD und dessen möglichen Verknüpfungen zu dem entstehenden REDD-Regime der UNFCCC (Kap. 10.5).

11.5.5 Methoden zur Unterstützung von Entscheidungen unter Unsicherheit

Im Kontext der von Wissensdefiziten geprägten Bioenergiedebatte ist zu untersuchen, welche Entscheidungsmethoden, die einzelne Akteure ihren Entscheidungen zugrunde legen, insbesondere bei Entscheidungen unter Unsicherheit und angesichts hoher Risiken. Neue Methoden zur Unterstützung von Entscheidungsfindung unter Unsicherheit sollten für die verschiedenen Akteursgruppen (z.B. Land- und Forstwirte, Regionalplaner, politische Entscheidungsträger) entwickelt werden, um diesen Personenkreisen künftig wissenschaftlich fundierte Landnutzungsentscheidungen möglich zu machen. Computerbasierte Entscheidungsunterstützungssysteme sollten weiterentwickelt werden (etwa wie das Sustainability Impact Assessment Tool, SIAT, des EU-Pro-

jekts SENSOR), mit deren Hilfe verschiedene Szenarien simuliert, gegenübergestellt und systematisch verglichen werden können.

Handlungsempfehlungen 12

Die Verwendung der erneuerbaren Energieressource Biomasse bietet Chancen, weist aber auch Risiken auf. Hoffnungen auf eine verringerte Importabhängigkeit von Öl und Gas oder auf die Nutzung von Biokraftstoffen zur CO_2-Emissionsminderung der Automobilität stehen gegen die Befürchtungen, dass etwa durch den Anbau von Energiepflanzen Landnutzungskonflikte zwischen Ernährung, Naturschutz und Bioenergie wahrscheinlicher werden. Aufgrund der großen Komplexität und Dynamik des Themas, des hohen Maßes an wissenschaftlicher Unsicherheit und der Vielzahl von Interessen ist es bisher nicht gelungen, eine integrierte Abwägung der Chancen und Risiken der Bioenergie als Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung vorzunehmen. Der WBGU möchte zeigen, dass eine nachhaltige Nutzung von Bioenergie möglich ist, die viele der Chancen nutzt und gleichzeitig viele der Risiken gering hält.

Die zentrale Botschaft des WBGU lautet, dass weltweit nachhaltige Potenziale für Bioenergie vorhanden sind, welche auf jeden Fall genutzt werden sollten. Die Rahmenbedingungen sind aber so zu setzen, dass Gefährdungen der Nachhaltigkeit, insbesondere der Ernährungssicherheit sowie der Ziele von Natur- und Klimaschutz, ausgeschlossen werden können. Dabei müssen die Bioenergiestrategien einzelner Staaten abhängig von ihren sozioökonomischen und ihren agro-ökologischen Gegebenheiten differenziert gestaltet werden. Richtschnur für die erforderlichen Weichenstellungen muss nach Ansicht des WBGU die strategische Rolle der Bioenergie als Baustein in der globalen Energiewende zur Nachhaltigkeit sein. Das Leitbild des WBGU richtet sich daher an zwei Zielen aus:

- *Erstens* soll die Bioenergie einen Beitrag zum Klimaschutz leisten, indem sie fossile Energieträger ersetzt und somit hilft, die Treibhausgasemissionen im Weltenergiesystem zu reduzieren. Die Speicherbarkeit der Bioenergieträger und ihr Einsatz als Regelenergie können einen strategisch wichtigen Beitrag zur Stabilisierung der Stromversorgung bei einem hohen Anteil von Wind- und Solarenergie im Energiesystem von Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern leisten. Langfristig kann Bioenergie in Kombination mit Sequestrierung sogar dazu beitragen, der Atmosphäre einen Teil des emittierten CO_2 wieder zu entziehen.
- *Zweitens* kann Bioenergienutzung zur Überwindung der Energiearmut beitragen. Dabei geht es zunächst um die Überwindung der traditionellen und gesundheitsschädlichen Nutzungsformen der Bioenergie in Entwicklungsländer. Die Modernisierung der traditionellen Bioenergiennutzung kann einen wichtigen Beitrag zur Armutsreduktion, zur Verbesserung der Gesundheit und zur Verminderung des Nutzungsdrucks auf natürliche Ökosysteme leisten. Rund 2,5 Mrd. Menschen haben derzeit keinen Zugang zu bezahlbaren und sicheren Energieformen (z.B. Elektrizität, Gas) zur Deckung ihrer Grundbedürfnisse. Moderne, aber einfache und kostengünstige Bioenergieformen können einen wichtigen Beitrag leisten, um die Energiearmut in Entwicklungs- und Schwellenländern signifikant zu reduzieren.

Das Leitbild macht deutlich, dass Bioenergie ein Querschnittsthema ist. „Bioenergiepolitik“ umfasst nicht nur Energie-, Landwirtschafts- und Klimapolitik, vielmehr spielen auch Verkehrs-, Außenwirtschafts-, Umwelt- sowie Entwicklungs- und Sicherheitspolitik in das sich konstituierende Politikfeld hinein. Hinzu kommt die komplexe Dynamik von Märkten. Energie- und Agrarmärkte werden über Bioenergie immer enger verzahnt, und gerade Energiemärkte sind stark durch strategische Interessen von Staaten geprägt. Hier sind also komplexe politische Gestaltungsaufgaben zu bewältigen, die über die Grenzen etablierter Politikarenen hinausreichen, so dass Akteure zusammenwirken müssen, die in der Vergangenheit nur wenig Berührungspunkte hatten. Für die überwiegend sektoral organisierte Politik stellt dies große Anforderungen an die Steuerungs- und Integrationsfähigkeit.

Bioenergiepolitik sprengt aber auch den Rahmen eines in Nationalstaaten organisierten internationalen Systems. Weil eine Beimischungsquote für Biokraftstoffe in Europa zur Entwaldung in anderen Teilen der Welt führen kann, steht Bioenergie beispiel-

haft für ein komplexes globales Problem, bei dem Handlungen staatlicher und nichtstaatlicher Akteure auf lokaler oder nationaler Ebene ungewollte Konsequenzen überregionaler bzw. globaler Art verursachen. Bioenergiepolitik macht daher auch eine Mehrebenenpolitik notwendig.

Die folgenden, spezifischen Handlungsempfehlungen sind in sechs Blöcke gruppiert, die inhärent Überschneidungen aufweisen und damit die Notwendigkeit der Mehrebenenpolitk bestätigen. Ausgangspunkt ist die konsistente Einbindung der Bioenergie in die Klimaschutzpolitik, das erste Teilziel des Leitbilds. Kapitel 12.1 beschäftigt sich daher mit den Anreizen und Verpflichtungen im Rahmen des UN-Klimaschutzregimes. Dabei können gleichzeitig auch Beiträge zum zweiten Teilziel des Leitbilds, der Überwindung der Energiearmut, geleistet werden. Weil aber das Klimaschutzregime keine kurzfristige Wirkung entfaltet und die Einhaltung weiterer Nachhaltigkeitsdimensionen (z.B. Ernährungssicherung oder Erhaltung biologischer Vielfalt) nicht sicherstellen kann, muss gleichzeitig die Festlegung von Standards und die Zertifizierung für Bioenergie zunächst auf bi- und multilateraler Ebene vorangetrieben werden. Kapitel 12.2 gibt hierzu zahlreiche Empfehlungen. Ein zentrales Problem der Bioenergienutzung stellen Flächennutzungskonkurrenzen beim Anbau von Energiepflanzen dar. Standards allein können dieses Problem nicht lösen. Daher sind weitergehende flankierende Maßnahmen zur Sicherung der globalen Nahrungsmittelproduktion und der biologischen Vielfalt sowie des Wasser- und Bodenschutzes auf zahlreichen Handlungsebenen notwendig, die in Kapitel 12.3 vorgestellt werden. Das technische nachhaltige Bioenergiepotenzial, vom WBGU im Jahr 2050 auf 84–166 EJ pro Jahr geschätzt, sollte genutzt werden. Ein wichtiges staatliches Gestaltungsinstrument ist dabei die Förderpolitik. Hier gilt es, einerseits Fehlanreize zu korrigieren und andererseits dem Leitbild entsprechende Entwicklungen zu fördern. Hierzu gibt der Beirat in Kapitel 12.4 Empfehlungen. Dem Teilziel des Leitbilds Überwindung der Energiearmut widmet der WBGU das Kapitel 12.5. Hier sieht der Beirat gleichermaßen große Handlungsdefizite wie Entwicklungspotenziale. Derzeit gibt es weder eine internationale Organisation noch ein Vertragswerk, das spezifisch für das Thema Bioenergie zuständig wäre. Stattdessen haben sich in den letzten Jahren eine Vielzahl an privaten Foren, UN-Aktivitäten und zwischenstaatlichen Prozessen entwickelt. Vorschläge zur Überwindung dieser fragmentierten institutionellen Situation legt abschließend Kapitel 12.6 vor.

12.1 Bioenergie konsistent in die internationale Klimaschutzpolitik einbinden

Anrechnungsverfahren für CO_2-Emissionen durch Bioenergie grundlegend reformieren

Die bestehenden Regelungen in der UNFCCC und im Kioto-Protokoll führen zu Fehlanreizen in Bezug auf Bioenergieproduktion und -nutzung bis hin zur Förderung klimaschädlicher Bioenergienutzung (Kap. 10.2). Der WBGU hält daher eine Befassung der UNFCCC-Gremien mit dem Thema Bioenergie für notwendig. Ziel sollte es sein, die Anrechnungsmodalitäten für die Verpflichtungen im Rahmen des Kioto-Protokolls bzw. seiner Nachfolgeregelung zu reformieren und die Zuordnung der Emissionen in den Treibhausgasinventaren dahingehend anzupassen, dass Fehlanreize und eine verzerrte Darstellung des Klimaschutzbeitrags von Bioenergienutzung vermieden werden. Der WBGU hält eine Regelung für sinnvoll, die folgende Elemente umfasst: Erstens darf die Nutzung von Bioenergie nicht weiter pauschal als frei von CO_2-Emissionen („Nullemission“) im Energiesektor gezählt werden. Der WBGU plädiert hier jedoch nicht für einen Ersatz der unterstellten Nullemissionen durch kumulierte Emissionen aus einer Lebenszyklusanalyse der Bioenergie, da dies mit den übrigen Zurechnungsmodalitäten innerhalb der UNFCCC nicht kompatibel wäre und zu Doppelzählungen führen würde (Kap. 10.2.2). Vielmehr sollten im Energiesektor die tatsächlich bei der Verbrennung der Biomasse entstehenden CO_2-Emissionen gezählt und angerechnet werden. Demgegenüber sollte die Aufnahme von CO_2 aus der Atmosphäre durch Energiepflanzen im Landnutzungssektor gezählt werden. Diese Korrektur würde die Behandlung von Bioenergie an dem auch ansonsten angewendeten Prinzip ausrichten, Emissionen grundsätzlich dem Ort und Zeitpunkt ihrer Entstehung zuzuordnen. Zweitens sollten die bisherigen Regelungen, bei der ausgewählte Emissionen und Absorptionen aus Landnutzung und Landnutzungsänderungen auf die Verpflichtungen der Staaten angerechnet werden bzw. werden können, durch eine vollständige Erfassung aller Emissionen aus diesen Sektoren ersetzt werden, die idealerweise in eine umfassende Vereinbarung zum Erhalt der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme innerhalb der UNFCCC eingebettet wären (s.u.). Drittens bedarf es Ergänzungen, die den Handel zwischen Staaten mit und Staaten ohne Verpflichtung zur Emissionsbegrenzung betreffen (Kap. 10.2.2.1).

Bioenergie im CDM differenziert betrachten

Die begrenzte Anzahl von CDM-Projekte zur Bioenergie hat derzeit nur einen geringen Einfluss auf die Bioenergienutzung in Schwellen- und Entwicklungsländern insgesamt. Einer Ausweitung von CDM-Projekten zum Anbau von Energiepflanzen ist mit Skepsis zu begegnen, solange nicht ausgeschlossen werden kann, dass es in Folge der Landnutzung zu den bekannten Verdrängungseffekten kommt und andernorts terrestrisch gespeicherter Kohlenstoff freigesetzt wird. Von besonderer Bedeutung für die Bioenergie im CDM sind potenzielle Neuregelungen zum LULUCF-Sektor im Rahmen eines Post-2012-Regime. Daraus werden auch Anpassungen im CDM notwendig werden. Leakage- und Permanenzprobleme des CDM können mit Hilfe pauschalierter Abschläge auf die zertifizierten Emissionsreduktionseinheiten zu einem gewissen Grad begrenzt werden. Insgesamt erscheinen diese Probleme aber für die ökologische Integrität zu bedeutend und zu wenig kontrollierbar, so dass dem CDM keine tragende Rolle bei der Emissionsreduktion im LULUCF-Sektor zukommen sollte.

CDM-Projekte zur Verbesserung oder Substitution von ineffizienter traditioneller Biomassenutzung sollten dagegen genutzt werden, um zur Verbreitung effizienter Technologien in ärmeren Entwicklungsländern und in ländlichen Räumen beizutragen. Aktuelle Entwicklungen unter der UNFCCC, vereinfachte Methoden für kleinskalige CDM-Projekte zu erlauben, die einen Übergang zu einer nachhaltigen, energetischen Biomassenutzung z.B. über hocheffiziente Öfen ermöglichen, gehen in die richtige Richtung. Dabei muss gleichzeitig die Integrität des CDM gewährleistet sein, d.h. nur tatsächliche und dauerhafte Emissionsreduktionen aus der Biomassenutzung sollten honoriert werden.

Emissionen durch Landnutzungsänderungen, vor allem Entwaldung, in Entwicklungsländern begrenzen

Da die gegenwärtige Ausweitung des Anbaus von Energiepflanzen zu einer Zunahme tropischer Entwaldung beitragen kann (Kap. 5.5), ist ein effektives Regime zur Verminderung der Emissionen aus Entwaldung und Walddegradation (REDD) im Rahmen der UNFCCC von hoher Bedeutung. Ein geeignetes REDD-Regime sollte einerseits wirksame Anreize setzen, rasche reale Emissionsminderungen durch eine Reduzierung der Entwaldung zu erreichen. Diese Emissionsminderungen sollten jeweils auf nationaler Ebene sichergestellt werden, um Leakage-Effekte zu vermeiden. Darüber hinaus sollten Anreize geschaffen werden, die natürlichen Kohlenstoffspeicher wie tropische Primärwälder dauerhaft vor Entwaldung und Degradation zu schützen und die Emissionen aus Graslandumbruch zu begrenzen. Für eine effektive Anreizsetzung muss das Regime internationale Finanztransfers in ausreichender Höhe mobilisieren. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sollte das Regime aus einer Kombination nationaler Emissionsbegrenzungsziele und projektbasierter Vorgehensweise bestehen (Kap. 10.2.2). Dabei wäre das REDD-Regime zu integrieren, so dass es idealerweise Bestandteil einer umfassenden Vereinbarung zum Erhalt der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme innerhalb der UNFCCC wäre (s.u.).

Umfassende Vereinbarung zum Schutz terrestrischer Kohlenstoffspeicher vorantreiben

Die CO_2-Emissionen aus dem LULUCF-Bereich sollten systematisch und vollständig in das Post-2012-Regime einbezogen werden, damit der Anreiz, den die UNFCCC zur Bioenergienutzung gibt, sich an ihrem tatsächlichen Klimaschutzbeitrag orientiert. Die CO_2-Aufnahme und -Abgabe der Biosphäre unterscheiden sich jedoch in vielen grundlegenden Aspekten – etwa Messbarkeit, Reversibilität, langfristige Kontrollierbarkeit, zwischenjährliche Schwankungen – von den Emissionen aus fossilen Energieträgern (Kap. 5.5). Aufgrund der sehr unterschiedlichen Charakteristika der Sektoren auch bezüglich der Zeitdynamik und Planbarkeit erscheinen separate Minderungsziele im Hinblick auf die Einhaltung der 2°C-Leitplanke zielführender als ein übergreifendes Minderungsziel. Der WBGU rät daher dazu, zukünftig nicht eine nationale Obergrenze für alle Emissionen zu vereinbaren, sondern für den Bereich des LULUCF gesonderte Verpflichtungen vorzusehen und schlägt vor, eine umfassende Vereinbarung zum Erhalt der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme zu verhandeln. Diese sollte erstens die Debatte zu REDD einbeziehen, zweitens die bestehenden Regelungen zur Anrechnung von Senken (auch durch CDM) auf die Minderungspflichten in den in Annex-A des Kioto-Protokolls aufgeführten Sektoren ersetzen und drittens alle CO_2-Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft vollständig umfassen. Trotz getrennter Zielvereinbarungen hält es der WBGU aus der Perspektive ökonomischer Effizienz für angebracht, eine gewisse Austauschbarkeit anzustreben, die jedoch aufgrund der Messschwierigkeiten und anderer Unsicherheiten von LULUCF-Emissionen deutlich begrenzt und mit Abschlägen verbunden sein sollte.

Europäische Klimapolitik: Anreize für Emissionsminderungen im Landnutzungsbereich setzen

Die Verpflichtungen der Annex-I-Staaten zur Begrenzung ihrer THG-Emissionen im Rahmen des Kioto-Protokolls beziehen sich bereits heute auch auf Emissionen in der Landwirtschaft und auf ausgewählte Emissionen aus dem Forstbereich (Kap. 10.2.2). Diese Verpflichtungen wurden in der EU-Politik bisher jedoch noch nicht systematisch in entsprechende Anreize für Land- und Forstwirte umgesetzt. Dies sollte künftig jedoch der Fall sein. Möglichkeiten bieten sich etwa im Rahmen der Direktzahlungen der ersten Säule (mit verbindlichen Cross Compliance-Verpflichtungen) und der Förderung der Entwicklung des ländlichen Raumes der zweiten Säule (u.a. Agrarumweltmaßnahmen) der gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP) an. Wie auch vom SRU (2008) empfohlen, sollte die Bundesregierung die anstehende Überprüfung der GAP in den Jahren 2008 und 2009 dazu zu nutzen, eine umfassende ökologische Reform der GAP einzuleiten. Sollten die Direktzahlungen weitergeführt werden, sollte Cross Compliance systematisch um Klimaschutzaspekte erweitert werden. Auch für die Agrarumweltmaßnahmen sollte eine Verbesserung der Zielorientierung angestrebt werden (SRU, 2008), und die Maßnahmen sollten auch auf Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel ausgerichtet werden.

12.2 Standards und Zertifizierung für Bioenergie und nachhaltige Landnutzung einführen

Unilateralen Mindeststandard für Bioenergieträger einführen

Der WBGU empfiehlt als ersten Schritt die Einführung eines verbindlichen Mindeststandards für Bioenergieträger auf EU-Ebene. Der Mindeststandard sollte für alle Arten von Bioenergieträgern gelten, die innerhalb der EU zur Energiegewinnung verwendet werden. Bioenergieträger, die den Mindeststandard nicht erfüllen, sollten nicht in Verkehr gebracht werden dürfen. Damit geht der Vorschlag des WBGU über die derzeitigen Pläne der EU, die Einhaltung eines Nachhaltigkeitsstandards als Voraussetzung für die Förderung flüssiger Biokraftstoffe einzufordern, deutlich hinaus. Für einen Bioenergiemindeststandard empfiehlt der WBGU eine Erweiterung der Nachhaltigkeitskriterien für flüssige Biokraftstoffe der EU-Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien um Methoden, die indirekte Landnutzungsänderungen bewerten, und um ein Kriterium zur Einschränkung der Nutzung gentechnisch veränderter Organismen (GVO). Einzelne elementare ILO-Kernarbeitsnormen sollten zudem verpflichtend in einem Bioenergiemindeststandard enthalten sein. Bezüglich der THG-Emissionen empfiehlt der WBGU anstatt einer Vorgabe für eine relative THG-Reduktion bezogen auf die End- bzw. Nutzenergie einen Mindestwert für die absolute THG-Reduktion bezogen auf die Menge an eingesetzter Rohbiomasse vorzugeben. So sollten durch den Einsatz von Bioenergieträgern die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilen Energieträgern um mindestens 30 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse gesenkt werden (Kasten 12.2-1).

Eine Förderung von Bioenergie sollte nur dann erfolgen, wenn zusätzliche Förderkriterien erfüllt werden, die eine Reduktion der Energiearmut oder erhöhten Klima-, Biodiversitäts- oder Bodenschutz implizieren. Eine allgemeine Voraussetzung für die Förderung sollte sein, dass durch den Einsatz der Bioenergie mindestens eine Reduktion der Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen um 60 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse im Vergleich zu fossilen Energieträgern erzielt werden kann. Als förderungswürdig erachtet werden vor allem die Nutzung biogener Abfall- und Reststoffe sowie der Anbau von Energiepflanzen auf marginalem Land, wenn dabei verbesserter Klima-, Boden-, Wasser- und Biodiversitätsschutz nachgewiesen werden kann und der Anbau auch bezüglich sozialer Kriterien positiv bewertet wird.

Zertifizierungssysteme für nachhaltige Bioenergieträger schaffen

Werden Mindeststandards für Bioenergieträger verbindlich eingeführt, müssen auch möglichst zeitnah Zertifizierungssysteme zum Nachweis ihrer Einhaltung geschaffen werden. Idealerweise sind solche Zertifizierungssysteme international und auf alle Arten von Biomasse für die energetische Nutzung sowie auf Bioenergieendprodukte anwendbar. Dies erleichtert die spätere Ausweitung der Bioenergiestandards auf alle Arten von Biomasse. Das im Auftrag des BMELV entwickelte System „International Sustainability and Carbon Certification“ (ISCC), das speziell für die Zertifizierung von Bioenergieträgern konzipiert wurde, ist ein erster Schritt in diese Richtung. Dieses oder ein vergleichbares Zertifizierungssystem sollte möglichst schnell umgesetzt werden.

Da die Einführung eines allgemeinen Biomassestandards erst mittelfristig zu realisieren ist, sollte die Pflicht zum Nachweis über die Einhaltung der Bioenergiestandards in einem ersten Schritt bei den Vertreibern der Endprodukte liegen. Diese würden wiederum von ihren Zulieferern den Nachweis über die Einhaltung der Standards bei der Produktion der Vorprodukte einfordern. Dadurch bestünde zunächst keine originäre Zertifizierungspflicht für Rohstoffe,

Kasten 12.2-1

Mindeststandards für die Bioenergieproduktion

- *Treibhausgasemissionen durch Einsatz von Bioenergieträgern reduzieren:* Reduktion der Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilen Energieträgern um mindestens 30 t CO_2eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse unter Berücksichtigung direkter und indirekter Landnutzungsänderungen. Die durch den Anbau von Biomasserohstoffen ab einem Stichtag verursachten Treibhausgasemissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen (inklusive der entgangenen Senkenwirkung) sollten die CO_2-Menge nicht überschreiten, die auf der entsprechenden Fläche innerhalb von 10 Jahren durch den Energiepflanzenanbau wieder fixiert werden kann („Landnutzungsstandard").
- *Indirekte Landnutzungsänderungen vermeiden:* Vermeidung der Verdrängung von produktiven Landnutzungen durch den Anbau von Energiepflanzen.
- *Schutzgebiete, natürliche Ökosysteme und Gebiete mit hohem Naturschutzwert erhalten:* kein Anbau von Energiepflanzen in identifizierten Ausschlussflächen (Schutzgebiete, Gebiete mit hohem Naturschutzwert); Schaffung ausreichender Pufferzonen; Einbetten von Anbausystemen für Energiepflanzen in die Landschaft; Prüfung ökologischer Risiken vor der Nutzung potenziell invasiver gebietsfremder Arten.
- *Bodenqualität erhalten:* keine langfristige Schwächung der Bodenfunktionen und der Bodenfruchtbarkeit durch den Anbau von energetisch genutzter Biomasse; Erfüllung der Anforderungen der guten landwirtschaftlichen Praxis; Erhalt der Nährstoffkreisläufe bei Reststoffnutzung.
- *Waldreststoffe nachhaltig nutzen:* Erhaltung der Nährstoffkreisläufe und der biologischen Vielfalt von Waldökosystemen bei der Nutzung von Waldreststoffen.
- *Wasser nachhaltig managen:* keine wesentliche Verschlechterung der Wasserqualität und des Wasserhaushalts; keine Übernutzung der Grundwasserressourcen.
- *Einfluss gentechnisch veränderter Organismen (GVO) kontrollieren:* Ausschluss der Ausbreitung veränderter Gene in wildlebende Pflanzen; Ausschluss von Einträgen in die Lebens- und Futtermittelkette; Einhaltung der nationalen und internationalen Biosicherheitsstandards.
- *Grundlegende Sozialstandards beachten:* Einhaltung einzelner elementarer ILO Kernarbeitsnormen: Gewährleistung von ausreichendem Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz.

die auch für andere Zwecke als die energetische Nutzung verwendet werden können, wie etwa Raps, Soja oder Palmöl. Damit auch Vorprodukte und Rohstoffe zertifiziert werden können, bietet sich die Einführung eines „Landnutzungsstandards" an, der den THG-Ausstoß beim Anbau von Rohstoffen inklusive direkter und indirekter Landnutzungsänderungen nach oben begrenzt. Mit der Einführung eines solchen Landnutzungsstandards für Bioenergierohstoffe kann die spätere Ausweitung auf alle Arten von Biomasse vorbereitet werden.

Während die Entwicklung von Zertifizierungssystemen und die Durchführung der Zertifizierung Marktakteuren überlassen werden können, muss der Staat die tatsächliche Einhaltung der Standards im Anschluss an die Zertifizierung kontrollieren, um die Legitimität der Standards zu erhöhen und Missbrauch zu verhindern. Hierzu müssen von staatlicher Seite Kontrollorgane geschaffen werden, die in der Lage sind, die Nichteinhaltung der geforderten Mindeststandards sowie das missbräuchliche Ausstellen und Führen von Zertifikaten zu sanktionieren.

Entwicklungs- und Schwellenländer bei der Einhaltung von Mindeststandards unterstützen

Für die Einhaltung der vom WBGU geforderten Leitplanken und Nachhaltigkeitsanforderungen ist auch von Schwellen- und Entwicklungsländern, unter Einschluss der am wenigsten entwickelten Länder (LDCs), die Einhaltung von Mindeststandards bei der Produktion von Bioenergieträgern zu fordern. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass für diese Länder die Einhaltung von Nachhaltigkeitskriterien und die erforderliche Zertifizierung eine große Belastung darstellen können. Deshalb sollten vor allem für LDCs technische und finanzielle Hilfen zum Aufbau nationaler Zertifizierungssysteme und Kontrollstellen sowie für die Durchführung der Zertifizierung in einzelnen Produktionsbetrieben gegeben werden. Weiter können für eine Anfangsphase Erleichterungen bei der Verifizierung der einzelnen Nachhaltigkeitskriterien vorgesehen werden. Die Möglichkeit zu Gruppenzertifizierung kann die Zertifizierungskosten für kleine landwirtschaftliche Betriebe, gleichermaßen in Entwicklungs- und Industrieländern, gering halten.

Bilaterale Standardsetzung als effektives Instrument nutzen

Bis ein global abgestimmter Biomassestandard geschaffen ist, sind auch bilaterale Standards ein effektives Instrument zur Erhöhung der Nachhaltigkeit in der Produktion von Bioenergieträgern. Die bisher abgeschlossenen bilateralen Abkommen zwischen Hersteller- und Importländern von Bioenergie nutzen allerdings das Potenzial für die Einbeziehung von Umwelt- und Sozialkriterien nur in geringem Ausmaß. Dies gilt beispielsweise auch für das im Mai 2008 zwischen Deutschland und Brasilien unterzeichnete Abkommen zur Zusammenarbeit im Bereich der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz. Der WBGU empfiehlt, in ähnlichen künftigen Abkommen konkrete und verbindliche Nach-

haltigkeitskriterien im Sinne eines Mindeststandards für die Produktion von Bioenergie zu verankern. Im Gegenzug sollte für die Handelspartner bei Einhaltung des Mindeststandards freier Marktzugang für Bioenergieträger gewährt werden. Bereits bestehende bilaterale Verträge sollten nach Möglichkeit noch in diese Richtung nachgebessert werden.

Multilaterale Ansätze zur Globalisierung von Standards verfolgen

Die Möglichkeit, Standards für Bioenergie auch in einem multilateralen Rahmen zu entwickeln und zu institutionalisieren, ist die aus WTO-rechtlicher Sicht zu bevorzugende Option und sollte ebenfalls angestrebt werden. Dafür spricht auch, dass bei alleinigem Vorgehen der europäischen Staatengemeinschaft weite Teile des Weltmarktes für Bioenergieträger unreguliert bleiben würden. Die Bundesregierung sollte sich dafür einsetzen, dass möglichst rasch ein internationaler Konsens zu einem Mindeststandard für nachhaltige Bioenergieproduktion sowie zu einer umfassenden, internationalen Bioenergiestrategie entwickelt wird. Aus Sicht des WBGU läge ein Erfolg versprechender Ansatz im Ausbau bestehender internationaler Initiativen, insbesondere der „Global Bioenergy Partnership“ (GBEP) im Rahmen der G8+5. Die GBEP ist ein wichtiges Instrument, um die multilaterale Politikformulierung zu beschleunigen. Mit der politischen Unterstützung durch die G8 könnte erreicht werden, dass die Entscheidungen in politikrelevante Foren, Institutionen und Prozesse eingebracht werden und deren Implementierung gewährleistet ist.

WTO-Konformität von Standards für Bioenergieträger herstellen

Die vom WBGU geforderten Mindeststandard sowie die Förderkriterien für den Biomasseanbau umfassen sowohl Kriterien zur Umwelt- als auch zur Sozialverträglichkeit des Produktionsprozesses von Bioenergieträgern. Bei der Einführung unilateraler Standards von Seiten der EU müssten auch Produzenten aus Nicht-EU-Ländern die Standards erfüllen, wenn sie ihre Produkte in die EU exportieren oder staatliche Förderung für den Rohstoffanbau in Anspruch nehmen möchten.

Die Frage der Vereinbarkeit von Umwelt- und Sozialstandards mit WTO-Recht ist zum heutigen Zeitpunkt nicht völlig geklärt. Aus rechtlicher Sicht sprechen gute Gründe für die grundsätzliche WTO-Konformität unilateraler europäischer Bioenergiestandards. Dies gilt insbesondere für Kriterien zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und zum Schutz der globalen Biodiversität, weil die Schutzwürdigkeit von Klima und Biodiversität in multilateralen Umweltabkommen (UNFCCC, CBD) völkerrechtlich festgeschrieben ist. Darüber hinaus sollten alle möglichen politischen Optionen genutzt werden, um die Akzeptanz sowohl begründeter Umweltstandards als auch der elementaren ILO-Kernarbeitsnormen im bestehenden WTO-Vertragsregime weiter zu erhöhen und langfristig sicherzustellen. Zur Zeit sind wesentliche Hindernisse für die umfassende Anerkennung von Umwelt- und Sozialstandards im Widerstand bestimmter Staatengruppen, insbesondere der Mehrzahl der Entwicklungsländer, zu sehen. Es ist deshalb erforderlich, im Rahmen der laufenden wie auch künftiger WTO-Verhandlungen der Vertrauensbildung im Verhältnis zwischen Industrie- und Entwicklungsländern ein großes Gewicht beizumessen.

Handelsliberalisierung in Bezug auf Environmental Goods and Services an Umweltzielen ausrichten

Im Rahmen der derzeitigen WTO-Verhandlungsrunde wird der Abbau von tarifären Handelshemmnissen für Produkte und Dienstleistungen geprüft, die von den Mitgliedstaaten als besonders umweltfreundlich bewertet werden. Die angestrebte Handelsliberalisierung in Bezug auf diese so genannten „Environmental Goods and Services“ (EGS) darf jedoch nicht dazu führen, dass das Ziel einer nachhaltigen Produktion und Nutzung der entsprechenden Güter und Dienstleistungen unterlaufen wird. Würde der Handel mit Bioenergieträgern als „environmental goods“ im Rahmen der WTO pauschal liberalisiert, ohne der Nachhaltigkeit des Herstellungsprozesses Rechnung zu tragen, stünde dies in offensichtlichem Gegensatz zu den Bemühungen, durch die Setzung eines Mindeststandards beim Import von Bioenergieträgern Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Produktion in den Herkunftsländern zu nehmen. Die Bundesregierung sollte daher im Rahmen der entsprechenden Verhandlungen darauf hinwirken, dass nur Güter als EGS klassifiziert werden, die in jedem Fall den vom WBGU geforderten Mindeststandards genügen bzw. aus nachhaltigen Bioenergienutzungspfaden stammen.

Ausweitung des Mindeststandards für Bioenergie auf alle Arten von Biomasse

Mittelfristig ist ein globaler Biomassestandard anzustreben, der die Produktion aller Biomassearten für verschiedenste Nutzungen (Nahrungs- und Futtermittel, energetische und stoffliche Nutzung) länder- und sektorübergreifend regelt. Auf EU-Ebene sollte deshalb eine entsprechende Regelung zur Ausweitung des Mindeststandards auf alle Arten von Biomasse vorbereitet werden. Auf multilateraler Ebene sollte die Gründung einer globalen Kommission für nachhaltige Landnutzung geprüft wer-

den, die Grundlagen, Mechanismen und Leitlinien zum globalen Landnutzungsmanagement erarbeitet (Kap. 12.6).

12.3 Nutzungskonkurrenzen nachhaltig regulieren

Die Landwirtschaft in ländlichen Regionen von Entwicklungsländern kann einen wichtigen Beitrag zur Verhinderung von Ernährungskrisen leisten. Sie wurde aber in der internationalen Zusammenarbeit seit Jahren vernachlässigt, was zu den weltweit steigenden Nahrungsmittelpreisen beigetragen hat. Der WBGU empfiehlt daher eine Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität durch verstärkte Investitionen, insbesondere in ländliche Entwicklung, nachhaltige kleinbäuerliche Landwirtschaft und Pflanzenzüchtung. Dies kann nur gelingen, wenn die Entscheidungsträger in den Entwicklungsländern der Entwicklung des ländlichen Raumes auch eine entsprechende Priorität einräumen. Hier sollte die multilaterale Entwicklungszusammenarbeit, die die ländliche Entwicklung in der vergangenen Dekade ebenfalls zu wenig beachtet hat, eine grundlegende Neuorientierung unterstützen.

12.3.1 Integrierte Bioenergie- und Ernährungssicherungsstrategie entwickeln

Der WBGU empfiehlt über die von der Ressortarbeitsgruppe „Welternährungslage“ in ihrem Bericht an das Bundeskabinett genannten Maßnahmen (Kasten 10.4-3) hinaus, den Anbau von Energiepflanzen jeweils in eine integrierte Bioenergie- und Ernährungssicherungsstrategie einzubinden, bei der die Ernährungssicherheit Vorrang hat. Weitere Bestandteile der integrierten Strategie müssen nachhaltige Wassernutzung sowie Bodenschutz sein. Besonders wichtig ist dies für die Gruppe der Low Income Food Deficit Countries (LIFDCs).

Dabei müssen parallel mit dem Anbau von Energiepflanzen die Flächenproduktivität der Nahrungserzeugung und die Nahrungsproduktion erhöht werden. Ländliche Entwicklung und der Agrarsektor wurden in der internationalen Zusammenarbeit seit Jahren vernachlässigt, was signifikant zur weltweiten Steigerung der Nahrungsmittelpreise beigetragen hat. Hier muss wieder umgesteuert werden. Ein kontrollierter Ausbau der Bioenergie kann sinnvoll nur mit weltweiten Anstrengungen zur Stärkung der Landwirtschaft einhergehen.

Angesichts der drastisch gestiegenen Nahrungsmittelpreise gibt es in jüngster Zeit auf internationaler Ebene verstärkt Bemühungen, abgestimmte Strategien zur Vermeidung von Nahrungsmittelkrisen zu entwickeln. In den Diskussionen herrscht dabei weitgehend Konsens über die zentralen Strategieelemente. Erforderlich sind erstens Maßnahmen, die dazu beitragen, die Ernährungssituation in betroffenen Regionen kurzfristig und unmittelbar zu verbessern. Zweitens müssen umgehend Maßnahmen in Angriff genommen werden, welche die Rahmenbedingungen für Ernährungssicherheit und Nahrungsmittelproduktion langfristig verbessern und die sich gleichzeitig konsistent in andere Politikfelder wie u.a. Klima- und Naturschutz einfügen. Die von Weltbank und FAO in Auftrag gegebene „Internationale Bewertung von landwirtschaftlichem Wissen, Forschung und Technologie für Entwicklung“ (IAASTD, 2008; auch „Weltagrarbericht“) fordert zurecht einen Wechsel in der Agrarpolitik, um der Komplexität von Agrarsystemen in ihren unterschiedlichen sozialen und ökologischen Kontexten besser gerecht zu werden. Dem Anbau von Energiepflanzen käme aus Sicht des WBGU dabei vor allem in Strategien und Projekten zur dezentralen ländlichen Energieversorgung eine gewichtige Rolle zu. Dabei ist zu beachten, dass der Anbau vorrangig auf marginalen bzw. degradierten Flächen gefördert wird (Kap. 7.4). Letztlich kann aus Sicht des WBGU allerdings nur regional- und kontextspezifisch und unter Einbeziehung der betroffenen Akteure abgewogen werden, wo der Anbau von Energiepflanzen nachhaltig erfolgen kann.

Um künftig besser auf Krisenfälle vorbereitet zu sein, wird ein effektives Frühwarnsystem benötigt. Die vorhandenen Monitoring-Kapazitäten, z.B. bei der FAO und dem Welternährungsprogramm, sollten gestärkt und effizienter vernetzt werden (Ressortarbeitsgruppe Welternährungslage, 2008). Der WBGU sieht darüber hinaus einen wachsenden Bedarf zur Erkennung von Risiken für die Ernährungssicherheit durch Nutzungskonkurrenzen mit dem Anbau von Energiepflanzen. Um die Risiken rechtzeitig zu erkennen, die sich aus dem wachsenden Druck auf die globale Landnutzung ergeben, sind globale Monitoring- und Frühwarnsysteme sehr wichtig.

12.3.2 Kopplung von Landnutzung, Nahrungsmittel- und Energiemärkten besser berücksichtigen

Die Herausforderungen zur Sicherung der Welternährung müssen heute vor dem Hintergrund des zunehmenden Drucks auf die globale Flächennutzung bewältigt werden und können nicht mehr allein Gegenstand nationaler Bemühungen sein. In einer globalisierten Welt bedarf die immer enger wer-

dende Verknüpfung von Landnutzung, Agrarpreisentwicklung und Energiemärkten deutlich intensiverer Berücksichtigung in der nationalen und internationalen Politik. So müssen Maßnahmen in dem einen Sektor stets auf ihre (internationalen) Rückwirkungen auf die anderen Bereiche geprüft werden. Mittelfristig geht es um die Konzipierung und Etablierung von regulierenden Mechanismen zur Reduzierung von Konflikten, etwa wenn Entwicklungen auf den Energiemärkten zu Fehlentwicklungen für die Ernährungssicherheit führen.

Ernährungssicherheit bei der Liberalisierung des Agrarhandels berücksichtigen

Langfristig ist für die Sicherung der Ernährung wichtig, dass von den Weltagrarmärkten Impulse für Produktionssteigerungen gerade in ärmeren Entwicklungsländern ausgehen. Hierzu sollten Importbarrieren für Agrargüter – vor allem Nahrungsmittel – stärker gesenkt werden sowie Exportsubventionen und andere Produktionsfördermaßnahmen, die Nachhaltigkeitskriterien zuwiderlaufen, weltweit, vor allem aber in den Industrieländern, zurückgeführt werden. In der Folge würden voraussichtlich die Preise auf den Weltagrarmärkten steigen, woraufhin die Nahrungsmittelproduktion in Entwicklungsländern, welche über komparative Produktions-vorteile verfügen, mittel- bis langfristig wachsen könnte. Allerdings sind ärmere Entwicklungs-länder häufig als Nettoimporteure von Agrargütern und Nahrungsmitteln (Low-Income Food-Deficit Countries) unmittelbar negativ von solchen Weltmarktpreissteigerungen betroffen. Zur Abfederung der resultierenden negativen Wirkungen in diesen Ländern bedarf es dann kurzfristig internationaler finanzieller Unterstützungs- und Ausgleichsmechanismen. Ebenso kann in Entwicklungsländern der kleinbäuerliche Sektor betroffen sein, wenn er bei einer allgemeinen Liberalisierung ohne weitere Beihilfen mit günstigen Agrarimporten konkurrieren muss. Für ärmere Entwicklungsländer sollten daher Ausnahmeregelungen für den kleinbäuerlichen Sektor vorgesehen werden, die es diesen Ländern ermöglichen, für bestimmte Agrargüter (höhere) Importzölle zu erheben sowie weitere Fördermaßnahmen zu leisten, um längerfristige nationale Strategien zur regionalen Entwicklung und nachhaltigen Nahrungsmittelproduktion abzusichern. Derartige Regelungen könnten als zulässige Green-box-Subventionen im WTO-Agrarabkommens aufgenommen bzw. in einer „development box“ verortet werden.

Finanzierung internationaler Nahrungsmittelhilfe verbessern

Finanzierungsfragen stellen sich auch bei Nothilfeprogrammen, d.h. bei der kurzfristigen direkten Unterstützung der Krisenländer mit Nahrungsmitteln. Die zentrale Institution ist hier das World Food Program (WFP), dessen finanzieller Rahmen 2,8 Mrd. US-$ beträgt. Angesichts der aktuellen weltweiten Krise hat das Programm einen zusätzlichen Finanzierungsbedarf von 750 Mio. US-$ angemeldet. Um für eine dauerhafte und ausreichende Ausstattung des WFP zu sorgen, kann es angebracht sein, eigenständige Finanzierungsquellen für das WFP zu etablieren. Im Kontext global wachsender Landnutzungskonkurrenzen empfiehlt der WBGU zu prüfen, ob eine internationale Finanzierung im Sinne des Verursacherprinzips durch Abgaben auf Landnutzungen außerhalb von Naturschutz und Nahrungsmittelproduktion in Frage käme. Dazu könnte z.B. ein Finanzierungsschlüssel in der Gebergemeinschaft vereinbart werden, der sich neben der ökonomischen Leistungsfähigkeit des Geberlandes auch an dessen Inanspruchnahme von Biomasse für die energetische Nutzung orientiert.

Massnahmen zur Senkung der Volatilität von Nahrungsmittelpreisen prüfen

Je enger Energie- und Nahrungsmittelpreise miteinander korrelieren, umso volatiler dürften sich die Nahrungsmittelpreise verhalten (Kap. 5.2). Starke Preisschwankungen nach unten erhöhen die Investitionsunsicherheit bei landwirtschaftlichen Produzenten und treffen insbesondere den kleinbäuerlichen Sektor, der kaum über Rücklagen verfügt und gegen Preisrisiken nicht oder höchst unzureichend abgesichert ist. Starke Preisschwankungen nach oben gefährden wiederum Nettonahrungsmittelkonsumenten mit niedrigem Einkommen. Hier gilt es zu prüfen, ob ein international koordinierter Ausbau von Nahrungsmittelreserven einen sinnvollen Weg darstellt, um bei einem kurzfristig signifikanten Preisanstieg das Weltmarktangebot zu erhöhen bzw. bei einem drastischen Preiseinbruch Nachfrage zu generieren. Innovative Maßnahmen zur Verringerung der Volatilität wären sehr wünschenswert (Kap. 10).

12.3.3 Steigenden Druck auf die Landnutzung durch sich ändernde Ernährungsweisen stärker beachten

Der stark steigende Druck auf die Landnutzung durch veränderte Ernährungsweisen, durch die flächenintensiven Ernährungsmuster in Industrieländern und durch deren Ausweitung in dynamisch wachsenden

großen Schwellenländern verschärft die globalen Flächennutzungskonkurrenzen. Dies ist eine heute noch weitgehend unterschätzte, große Herausforderung für die Zukunft, die mehr Aufmerksamkeit verdient. Durch die Ausbreitung westlicher Ernährungsmuster mit ihrem hohen Anteil an Fleisch- und Milchprodukten werden auch die Potenziale für den Anbau von Energiepflanzen eingeschränkt (Kap. 5.2). In LIFDCs, besonders in Afrika, kann man beobachten, dass großflächig Agrarland von ausländischen Investoren aufgekauft wird, um die wachsende Nachfrage nach Futtermitteln aus anderen Ländern zu befriedigen.

Der Einfluss der Ernährungsgewohnheiten ist nicht zu unterschätzen: bis 2030 werden ca. 30 % der für die Ernährung erforderlichen Produktionssteigerungen für Nahrungsmittel hierauf zurückgehen (Kap. 5.2). Diese Zusammenhänge, d.h. die Bedeutung von Essgewohnheiten für Landnutzung und Ernährungssicherheit sind noch viel zu wenig bekannt und sollten daher über Aufklärungs-kampagnen den Verbrauchern nahe gebracht werden. Ziel ist es dabei, in einem ersten Schritt Problembewusstsein vor allem in den Industrieländern zu erzeugen und zu Verhaltensänderungen zu motivieren. Hierzu sollten auch Initiativen auf internationaler Ebene, z.B. im Umfeld der UN-Organisationen angestoßen werden.

Diese Initiativen sollten durch eine internationale Zusammenarbeit zur Flächeninanspruchnahme für den Pro-Kopf-Verbrauch von Nahrungsmitteln unterstützt werden. Dabei geht es um Flächen im In- und Ausland, die für die Produktion der im Inland konsumierten Nahrungsmittel eingesetzt werden. Nachhaltigkeitskonzepte wie der ökologische Fußabdruck können veranschaulichen, dass global derzeit natürliche Ressourcen über ihre Regenerationsgrenzen hinaus beansprucht werden. Auch wenn die Biomassenutzung für die Nahrungsmittel-produktion hier nicht isoliert von anderen Biomassenutzungen betrachtet werden darf und noch offene Fragen zur Methodik und Operationalisierung dieser Analysekonzepte bestehen, sollten vor allem Industrieländer initiativ werden, die einen hohen Pro-Kopf-Verbrauch an flächenintensiv produzierten Nahrungsmittel aufweisen. Ziel sollte zunächst sein, eine eindeutige Datenbasis über die Flächeninanspruchnahme für Nahrungsmittel zu ermitteln. Länder könnten sich dann verpflichten, den jeweiligen Pro-Kopf-Flächenverbrauch für Nahrungsmittel offen zu legen. Im Weiteren sollten im Rahmen der Staatengemeinschaft Strategien entwickelt werden, wie die Pro-Kopf-Inanspruchnahme abgesenkt werden kann. Ein Aspekt sollte dabei u.a. der sehr hohe Nebenverbrauch (Nachernteverluste, Wegwerfen) von Nahrungsmitteln sein. Diese Strategien können dazu beitragen, dass der Pro-Kopf-Verbrauch von solchen Nahrungsmitteln zurückgeht, die besonders flächenintensiv produziert werden. Langfristig könnten nationale Selbstverpflichtungen zur Reduktion der Pro-Kopf-Flächeninanspruchnahme hinzukommen. Auch die schnell wachsenden Schwellenländer sollten in diese Zusammenarbeit eingebunden werden.

12.3.4 Biodiversitätspolitik für einen nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen umsetzen

Aus Sicht des Biosphärenschutz stellt die weltweit zunehmende Bioenergienutzung zwei zentrale Herausforderungen an die Biodiversitätspolitik: Um die durch die Bioenergienutzung direkt oder indirekt ausgelöste Konversion natürlicher Ökosysteme einzuschränken, müssen im Rahmen des globalen Schutzgebietssystems erstens zusätzliche Schutzgebiete ausgewiesen und bestehende Gebiete unter ein qualitativ verbessertes, effektives Management gestellt werden (Kap. 10.5.1). Vor allem muss dafür eine ausreichende Finanzierung des Schutzgebietssystems aus nationalen und internationalen Quellen ermöglicht werden (Kap. 10.5.2). Zweitens muss beim Anbau von Energiepflanzen oder bei der Nutzung von Wäldern zur Bioenergiegewinnung die Erhaltung und nachhaltige Nutzung biologischer Vielfalt über geeignete Bioenergiestandards gewährleistet werden (Kap. 10.5.3), wofür die CBD durch Entwicklung von Biodiversitätsleitlinien einen Beitrag leisten kann.

LifeWeb-Initiative mit Leben füllen

Die LifeWeb-Initiative, die auf Anregung Deutschlands auf der COP-9 vorgestellt wurde (BMU, 2008e), soll durch bilaterale Partnerschaften die Umsetzung und Finanzierung des CBD-Arbeitsprogramms Schutzgebiete fördern. Die Initiative und insbesondere die Zusage der Bundesregierung, erhebliche zusätzliche finanzielle Mittel dafür bereit zu stellen, sind sehr zu begrüßen. Jetzt kommt es darauf an, auch andere Geberländer davon zu überzeugen, LifeWeb zu unterstützen. Parallel sollten konkrete bilaterale Projekte mit den bereits zugesagten Mitteln zügig vorangebracht werden. Ein Erfolg dieser Initiative trägt nicht nur zum 2010-Ziel der CBD bei, sondern kann auch als Nukleus für eine Weiterentwicklung der CBD-Regelungen zu Schutzgebieten fungieren.

Vereinbarungen zum Biodiversitätsschutz durch Kompensationszahlungen stabilisieren

Eine Strategie zur Sicherstellung einer global nachhaltigen Landnutzung sollte den weltweiten Ausbau internationaler Kompensationszahlungen vorsehen. Ohne Kompensationen für entgangene Einkommen durch Land- und Forstwirtschaft werden vor allem Entwicklungsländer kaum bereit oder in der Lage sein, auf die in diesen Sektoren generierten Chancen auf Wirtschaftswachstum, sei es auch nur kurz- bis mittelfristiger Natur, zu verzichten. Dies gilt besonders in Phasen steigender Agrar- und Bioenergiepreise. In diesem Kontext ist in Pilotprojekten zu prüfen, inwieweit nationale Habitat-Banking-Systeme in Industrieländern für Anbieter von Ökosystemleistungen aus Entwicklungsländern geöffnet werden sollten.

Mehr Mittel für Schutzgebiete in den Finanzierungsmechanismen mobilisieren

Angesichts der kritischen Bedeutung der Finanzierung für die Ausweisung neuer und das verbesserte Management bestehender Schutzgebiete stellt sich generell die Aufgabe, zusätzliche finanzielle Mittel zur Verfügung zu stellen. Richtschnur ist hier eine Mobilisierung von 20–30 € pro Kopf und Jahr in den Hocheinkommensländern, um die bestehende Finanzierungslücke zu schließen (Kap. 10.5). Transformations- und Schwellenländer sowie reiche Rohstoffländer sollten zunehmend stärker in die Finanzierung eingebunden werden. Schon jetzt sollten die Weichen gestellt werden für einen marktähnlichen Mechanismus, in dem die Zusicherung des Schutzes zuvor zertifizierter Flächen gegen ein Entgelt (Kompensationszahlungen) gehandelt wird.

Zusammenspiel der CBD mit UNFCCC optimieren

Angesichts des Vorrangs klimapolitischer Themen in den Foren der globalen Umweltpolitik und der vielfältigen Schnittstellen zwischen Klima- und Biodiversitätsschutz muss eine geeignete Beziehung zwischen den unterschiedlichen politischen Prozessen gefunden werden, die den Biodiversitätsschutz fördert bzw. nicht behindert. Der auf der COP-9 der CBD beschlossene inhaltliche Beitrag zur Klimarahmenkonvention (UNFCCC) kann dabei nur ein erster Anfang sein. Eine bessere Vernetzung der wissenschaftlichen Gremien von UNFCCC und CBD ist ebenfalls anzustreben. Auf nationaler Ebene sollte eine bessere intra- und interministerielle Abstimmung der zuständigen Regierungsstellen erfolgen. Überlegungen, Finanzierungsmechanismen aus dem Umfeld des Klimaschutzes, z.B. Erlöse aus der Versteigerung von CO_2-Zertifikaten, oder speziell die Finanzierung vermiedener Entwaldung (REDD-Prozess) für ein globales Schutzgebietsnetzwerk nutzbar zu machen, sollten auf ihre Eignung geprüft werden.

Weiterentwicklung der CBD-Regelungen in Richtung auf ein Schutzgebieteprotokoll prüfen

Die Evaluierung des 2010-Ziels der CDB und der Umsetzung des Arbeitsprogramms zu Schutzgebieten wird auf der COP-10 in Japan vorgenommen werden. Wenn sich die bisher beobachtbaren Trends fortsetzen, wird dieses Ziel voraussichtlich verfehlt werden. Dies ist nicht zuletzt abhängig vom Erfolg der in Bonn beschlossenen Initiativen. Aktuelle Studien machen die ökonomische Bedeutung der Erhaltung biologischer Vielfalt eindrücklich klar. Der parallel laufende REDD-Prozess in der UNFCCC wird den Wert natürlicher Ökosysteme für den Klimaschutz verdeutlichen. Ein weiterer wichtiger Baustein für die Entwicklung der CBD ist die Einrichtung eines dem IPCC ähnlichen wissenschaftlichen Beratungsgremiums für die biologische Vielfalt, dessen regelmäßige Berichterstattung auch die Bewusstseinsbildung fördern würde. Unter derart veränderten Rahmenbedingungen könnte langfristig eine Erweiterung der CBD-Regelungen in Richtung rechtliche Verpflichtung möglich werden, welche die Umsetzung von Maßnahmen zu Schutzgebieten mit Finanzierungsinstrumenten verbindet. Daher sollten Inhalte und politische Machbarkeit eines solchen Schutzgebietsprotokolls und die möglichen Verknüpfungen zu dem entstehenden REDD-Regime der UNFCCC bereits heute als Option geprüft werden (Kap. 11.5.4).

Entwicklung von Biodiversitätsleitlinien für Nachhaltigkeitsstandards im Rahmen der CBD fördern

Angesichts der Ergebnisse der COP-9 ist mit schnellen Fortschritten der CBD im Bereich Bioenergie nicht zu rechnen. Dennoch sollte der Prozess, im Rahmen der CBD Biodiversitätsleitlinien als Input für Nachhaltigkeitsstandards zu erarbeiten, durch die deutsche CBD-Präsidentschaft gefördert und so weit als möglich beschleunigt werden. Als wichtiger Beitrag sollte parallel dazu der Ausbau der Weltdatenbank zu Schutzgebieten (UNEP-WCMC, 2008) gefördert werden, um die notwendigen Monitoringkapazitäten aufzubauen. Der Impetus für Nachhaltigkeitsstandards im Bioenergiebereich sollte mittelfristig genutzt werden, um zu allgemeinen Leitlinien für alle Formen der Biomasseproduktion zu kommen.

12.3.5
Wasser- und Bodenschutz mit dem Anbau Energiepflanzen langfristig verbessern

Das Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture (IWMI, 2007), die SIWI-Studie (Lundqvist et al., 2008) und die GLASOD-Studie (Oldeman et al., 1991; Oldeman, 1992) machen deutlich: Die aktuellen Trends zur globalen Wasser- und Bodennutzung zeigen in die falsche Richtung (Kap. 5.6). Ohne Politikwandel wird der Weg in vielen Regionen in eine verschärfte Wasserkrise und zu erhöhter Bodendegradation führen.

Analyse der regionalen Wasser- und Bodenverfügbarkeit zur Voraussetzung machen

Da Wasser und Boden in vielen Regionen prekäre Ressourcen sind, sollte vor der großflächigen Förderung von Bioenergieanbausystemen eine integrierte Analyse der regionalen Wasser- und Bodenverfügbarkeit vorgenommen werden. Nicht angepasste Bioenergieanbausysteme (Kap. 7.1) und der global wachsende Energiehunger können den Nutzungsdruck auf Boden- und Wasserressourcen stark erhöhen. Heute ist das global gesehen noch kein akutes Problem, aber bei Förderung nicht nachhaltiger Anbausysteme kann sich dies in kritischen Regionen zum Problem entwickeln. In jedem Fall sollte der Anbau von Energiepflanzen nicht dazu führen, dass eine Region unter intolerierbaren Wasserstress gerät oder dass die Bodendegradation verstärkt wird. In Regionen, die bereits unter hohem Wasserstress leiden oder stark von Bodendegradation betroffen sind, sollte der Anbau von Energiepflanzen diese negativen Umweltwirkungen nicht verstärken. Daher sollte der Anbau von Energiepflanzen jeweils in eine regionale Strategie zum nachhaltigen Boden- und Wassermanagement integriert werden.

Energiepflanzenanbau zur Restaurierung marginaler Flächen nutzen

Bei Wahl des richtigen Anbausystems kann die Kultivierung von Energiepflanzen auf marginalen und degradierten Böden sogar zu einer Verbesserung der Böden führen. Auf lange Sicht bietet voraussichtlich nur ein über mehrere Jahrzehnte andauernder Anbau von Energiepflanzen auf marginalen und degradierten Flächen auch eine strategische Option, weil durch den Anbau von Energiepflanzen restaurierte Flächen langfristig zumindest teilweise für die Nahrungsproduktion zur Verfügung stehen könnten. Der zunehmende Druck auf die Landnutzung könnte dadurch partiell gedämpft werden.

Bioenergienutzung in die Desertifikationsbekämpfung einbetten

Die Desertifikationskonvention (UNCCD) bietet eine Plattform, um eine nachhaltige und armutsorientierte Landnutzung in den von Dürren und Desertifikation betroffenen Ländern programmatisch bzw. konzeptionell zu unterstützen, vor allem über das Instrument der Nationalen Aktionsprogramme (NAPs) zur Desertifikationsbekämpfung (Kap. 10.6). Im Rahmen von NAPs könnte auch die Anwendung von Standards für eine nachhaltige Bodennutzung, ganz konkret auch für den Anbau von Bioenergiepflanzen, gefördert werden. Darüber hinaus bietet der 2007 verabschiedete 10-Jahres-Strategieplan der UNCCD zahlreiche Möglichkeiten, um Bewusstseinsbildung, Bewertung von Bioenergie, Standardsetzung gerade im Hinblick auf Desertifikationsbekämpfung sowie die Politikgestaltung für eine nachhaltige Bioenergienutzung im Allgemeinen zu befördern. Konkret sollte im Rahmen der NAPs eine nachhaltige Bioenergiestrategie entwickelt und umgesetzt sowie die Integration dieser NAPs in die übergeordneten nationalen Entwicklungsstrategien (also meist den PRSPs) sichergestellt werden.

12.4
Förderpolitiken für Bioenergie gezielt einsetzen

Die verschiedenen Bioenergiepfade weisen sehr unterschiedliche Umweltwirkungen auf und tragen nicht in gleichem Maße zu Klima- und Biosphärenschutz bei (Kap. 5). Im schlechtesten Fall laufen sie den Klima- und Biosphärenschutzzielen der Bundesregierung zuwider. Folglich verdient nicht jede Art der Bioenergie eine Förderung. Der WBGU hat allerdings einige Bioenergieanbausysteme und -konversionspfade identifiziert, die in nachhaltiger Weise zum Klimaschutz, zur Überwindung der Energiearmut und zu einer nachhaltigen Energieversorgung beitragen und deshalb gefördert werden sollten.

Der WBGU empfiehlt, nicht nachhaltige Bioenergieträger, die den vom WBGU vorgeschlagenen Mindeststandards (Kap. 10.3.1) nicht genügen, von der Nutzung ganz auszuschließen. Mindeststandards können zunächst in Form unilateraler Standards auf EU-Ebene beschlossen werden. Bemühungen, diese Standards mit Hilfe bi- und multilateraler Abkommen auch in anderen Ländern und auf internationaler Ebene zu verbreiten, sollten zusätzlich in Angriff genommen werden (Kap 12.3.1).

Als Voraussetzung für die direkte Förderung von Bioenergiepfade müssen zudem anspruchsvollere Förderkriterien (Kap. 10.3.1.2) erfüllt sein. Es sollten grundsätzlich nur Bioenergiepfade gefördert werden, die auf besonders nachhaltige Weise zum Kli-

maschutz beitragen. Darunter versteht der WBGU, dass nicht nur der Mindeststandard eingehalten wird, sondern dass unter Berücksichtigung der gesamten Lebenszyklusemissionen durch den Einsatz der Bioenergie mindestens 60 t CO_2 eq pro TJ eingesetzter Rohbiomasse eingespart werden können. Da aber aus praktischen Gründen die Förderung an verschiedenen Stufen im Produktionsprozess (Anbau-, Konversions- und Anwendungssysteme) erfolgen sollte, muss hier in der Regel mit Standardannahmen über die jeweils anderen Stufen gearbeitet werden.

Speziell im Hinblick auf eine Förderung des Anbaus von Energiepflanzen erachtet es der WBGU als erforderlich, dass zusätzlich ökologische und soziale Kriterien erfüllt sein müssen. Bei der Mobilisierung von biogenen Reststoffen sollten ebenfalls ökologische Grenzen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit berücksichtigt werden. Schließlich sollte die Förderung von Konversions- und Anwendungssysteme so gestaltet werden, dass sie sich in das Leitbild der Energiewende zur Nachhaltigkeit einfügt, ungewünschte Pfadabhängigkeiten sollten vermieden und zukunftsträchtige Technologien wie z. B. Elektromobilität gefördert werden.

Nachhaltigkeit der Energiesysteme umfasst außer dem Klimaschutz auch die Beseitigung von Energiearmut. Die Modernisierung der netzunabhängigen bzw. traditionellen Nutzung von Bioenergie kann besonders im ländlichen Raum von Entwicklungsländern zur Überwindung dieser Energiearmut einen wertvollen Beitrag leisten. Hier erscheint dem WBGU eine Förderung von bioenergiebasierten Projekten auch dann gerechtfertigt, wenn die Klimaschutz- und Förderkriterien nicht voll erfüllt werden.

12.4.1 Agrarförderung umgestalten

Anbauanreize für Energiepflanzen auf Ausnahmen beschränken

Fördermaßnahmen speziell für den Energiepflanzenanbau weisen häufig eine relativ geringe Effizienz und Effektivität auf. Außerdem verstärken sie im Allgemeinen Landnutzungskonkurrenzen. Jede Förderung sollte dahingehend überprüft werden, ob von ihr kontraproduktive Effekte ausgehen: Die bestehende Förderung nicht nachhaltiger Biomasseproduktion, die den WBGU-Mindeststandards nicht genügt, sollte zurückgeführt werden. Die Förderung nachhaltiger Biomasseproduktion für energetische Zwecke kann empfohlen werden, wenn durch die Landnutzung Natur- oder Bodenschutzleistungen unterstützt werden oder es sich um Projekte zur Reduzierung von Energiearmut handelt (Förderkriterien für den Biomasseanbau). Dabei sollten Energie-, Agrar- und Umweltpolitik ressortübergreifend abgestimmt werden.

Anbausubventionen für Energiepflanzen fokussieren

Produktionssubventionen im Agrarsektor, vor allem in den Industrieländern, führen zu Marktverzerrungen im globalen Agrarhandel, einem ineffizienten Subventionswettlauf der Anbieterländer und behindern die Entwicklung vieler ärmerer Länder. Das gilt auch für Subventionen für den Anbau von Energiepflanzen, welche darüber hinaus die Flächennutzungskonkurrenz mit Nahrungsmitteln verschärfen. Daher empfiehlt der WBGU grundsätzlich auf eine weitgehende Beseitigung aller Produktionssubventionen im Agrarsektor hinzuarbeiten. Gleichwohl sollten bestimmte Anbausubventionen, die einen entwicklungs- und umweltpolitisch hohen Nutzen stiften, von der Streichung nicht nur ausgenommen, sondern international alimentiert werden. Dies sind Subventionen für den nachhaltigen Anbau in Entwicklungsländern im Rahmen von Projekten, die der unmittelbaren Beseitigung von Energiearmut dienen, sowie der Anbau mehrjähriger Energiepflanzen auf degradierten und marginalen Böden. Entsprechend empfiehlt der WBGU, die explizite Einordnung solcher Subventionen als zulässige Subventionen im Rahmen der WTO.

12.4.2 Energetische Nutzung biogener Abfall- und Reststoffe voranbringen

Durch die nachhaltige Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe werden weitgehend die Nutzungskonkurrenzen vermieden, die Energiepflanzen hervorrufen, so dass durchgehend eine hohe Klimaschutzwirkung erzielt werden kann. Daher empfiehlt der WBGU, der Nutzung der Rest- und Abfallstoffe deutliche Priorität gegenüber der Nutzung von Energiepflanzen einzuräumen. Die höchste Klimaschutzwirkung erzielen Rest- und Abfallstoffe in der Stromerzeugung, insbesondere wenn sie Kohle verdrängen. Insgesamt sind verstärkt Anreize zu setzen, damit Reststoffe der energetischen Nutzung zugeführt werden. Bisher ungenutzte Potenziale biogener Abfall- und Reststoffe lassen sich am ehesten durch eine gezielte und differenzierte Förderung erneuerbarer Energien in der Strom- und Wärmeerzeugung mobilisieren, wobei die Anreize für den Einsatz biogener Abfälle und Reststoffe hinreichend groß gegenüber der Förderung anderer biogener Sekundärenergieträger zu gestalten sind. Gleichzeitig muss notfalls über Regulierungen gewährleistet sein, dass bei der

Reststoffentnahme aus Wäldern und von Äckern ökologische Nachhaltigkeitskriterien eingehalten werden. Zusätzliche Anreize zur Mobilisierung lassen sich durch Regelungen zur Abfalldeponierung und Unterstützung von Sammlung- und Transportinfrastrukturen setzen. Eine Förderung der energetischen Abfall- und Reststoffnutzung muss die Ressourcenkonkurrenzen mit stofflichen Nutzungen im Blick haben und im Idealfall Pfade der Kaskadennutzung befördern.

12.4.2 Technologiepolitik neu ausrichten

Aus der Förderung flüssiger Biokraftstoffe aussteigen und Elektromobilität fördern

Die Förderung vor allem flüssiger Biokraftstoffe lässt sich nach Ansicht des WBGU besonders in Industrieländern unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten nicht rechtfertigen. Gegen eine Förderung sprechen u.a. die hohen Vermeidungskosten von Treibhausgasemissionen, die geringen bzw. überwiegend negativen Vermeidungsleistungen pro Fläche und die Gefahr von Lock-in-Effekten in eine ineffiziente Verkehrsinfrastruktur auf der Basis von Verbrennungsmotoren. Allenfalls in einigen Entwicklungs- und Schwellenländern lässt sich unter bestimmten Voraussetzungen der Ausbau der Biokraftstoffproduktion für den regionalen Verbrauch für eine Übergangszeit rechtfertigen, wenngleich auch hier Subventionen aus Effizienz-, Umwelt- und sozialen Aspekten kritisch zu sehen sind.

Der WBGU empfiehlt deshalb den raschen Ausstieg aus der Förderung von Biokraftstoffen zumindest in Industrieländern und insbesondere ein sofortiges Einfrieren von Beimischungsquoten. Innerhalb der nächsten drei bis vier Jahre sollten außerdem die derzeitigen Beimischungsvorgaben von Biokraftstoffen zu fossilen Kraftstoffen ganz zurückgenommen werden.

Im Verkehrsbereich erlaubt die Bioenergienutzung über Stromerzeugung und elektrische Fahrzeuge die höchsten energetischen Nutzungsgrade (im Verhältnis zu Biokraftstoffen in konventionellen Verbrennungsmotoren um den Faktor zwei oder größer). Darüber hinaus werden dadurch die Emissionen von Feinstaub und Lärm drastisch reduziert. Über die Elektromobilität ist es zudem möglich, im Verkehrssektor eine Sequestrierung der CO_2-Emissionen zu erreichen. Staatliche Förderpolitiken können Unternehmen in ihrer Technologieentwicklung bei Energiespeichern und Fahrzeugen sowie beim Aufbau der Anschlussmöglichkeiten an das Stromnetz unterstützen. Eine staatliche Förderung der Nachfrage sollte primär durch monetäre Anreize (z.B. Kfz- und Kraftstoffsteuern) erfolgen, um den technologischen Findungsprozess nicht unnötig einzuengen (10.7.6).

Ausgewählte Bioenergiepfade zur Stromerzeugung fördern

Bei der Substitution von Kohle durch Bioenergieträger für die Stromerzeugung wird die höchste Klimaschutzwirkung erzielt. Dabei sind die mit verschiedenen Konversionspfaden wie der Mitverbrennung im Kohle- bzw. Heizkraftwerk, der Nutzung von Biogas aus der Vergärung und Rohgas aus der Vergasung in BHKW oder des Einsatzes von Biomethan in BHKW oder GuD-Kraftwerken erreichbaren Treibhausgasminderungen zunächst in etwa vergleichbar. Eine höhere Klimaschutzwirkung lässt sich beim Einsatz von Biomethan allerdings dann erzielen, wenn das beim Herstellungsprozess ohnehin abzutrennende CO_2 sicher deponiert werden kann. Die Verstromung von Biomasse hat den zusätzlichen Vorteil, dass sie anders als flüssige Biokraftstoffe für den Verkehr den Weg in die Elektromobilität erleichtert.

Der WBGU empfiehlt deshalb in Ländern mit einem nennenswerten Kohleanteil bei der Stromerzeugung Strom aus biogenen Energieträgern dann zu fördern, wenn sich eine Treibhausgasminderung von mindestens 60 t CO_2 pro TJ eingesetzter Rohbiomasse gegenüber dem fossilen Referenzsystem ergibt und die politischen Rahmenbedingungen so gesetzt sind, dass eine Substitution fossiler Energieträger mit hohen Treibhausgasemissionen wahrscheinlich ist. Bei den genannten Bioenergiepfaden wird dieser Wert in der Regel erreicht, wenn biogene Abfall- und Reststoffe verwendet werden, während dies bei der Nutzung von Energiepflanzen nicht bei allen Pfaden gelingt.

Geeignete Instrumente der Förderung sind Einspeisevergütungen, aber auch andere Förderinstrumente einschließlich direkter Subventionen sind ein gangbarer Weg. Von Quoten indes rät der WBGU ab, da hierdurch eine Zwangsnachfrage nach Bioenergie generiert würde, welche angesichts der mit dem Anbau von Energiepflanzen verbundenen erheblichen Landnutzungskonkurrenzen anders als bei Solar- oder Windenergie höchst problematische Nebenwirkungen auslösen kann.

Die Verwendung von Biomethan ist aus systemischen Gründen besonders attraktiv. Neben der relativ einfachen Möglichkeit der CO_2-Sequestrierung kann Biomethan über die in vielen Industrieländern bestehende Infrastruktur der Erdgasnetze gesammelt bzw. verteilt und in BHKW bzw. GuD-Anlagen mit hoher Effizienz am Ort des Bedarfs verstromt werden. Der WBGU empfiehlt daher eine zusätzliche gezielte Förderung der Biomethanpfade, wenn das beim Herstellungsprozess anfallende CO_2 sicher

gelagert, und das Biomethan in der Verstromung eingesetzt wird.

Ergänzend dazu sollten der Ausbau des Gasnetzes vorangetrieben und Netzbetreiber zur Einrichtung von Pumpstationen zur Schaffung des Übergangs von dezentralem Biomethan in Leitungssysteme mit höherem Druckniveau verpflichtet werden, um den Netzzugang für Anlagenbetreiber zu erleichtern.

Kraft-Wärme-Kopplung und Gas-und-Dampf-Kraftwerke fördern

Für eine effiziente Nutzung der Bioenergie in Energiesystemen ist die Verbreitung und Anwendung technisch effizienter Konversionsanlagen von hoher Bedeutung. Dies gilt vor allem für Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sowie für Gas- und Dampf (GuD)-Kraftwerke. Die Wettbewerbsfähigkeit dieser Anlagentechniken wird maßgeblich durch den energie- und klimapolitischen Rahmen beeinflusst. Daher ist es wichtig, dass die Zertifikatszuteilung in Emissionshandelsystemen nicht kostenlos erfolgt bzw. kostenlose Zuteilungen wie im Europäischen ETS entschlossen zurückgeführt werden. Um die hohe Effizienz von KWK im ETS anzuerkennen, sollten weiterhin Freizertifikate zugeteilt bzw. Abschläge bei den Zertifikatspflichten vorgesehen werden. In Sektoren, die nicht dem Emissionshandel unterworfen sind, sollten partielle Steuerbefreiungen fortgeschrieben werden. In Ländern ohne Emissionshandel oder ohne CO_2-Emissions-abgaben können Investitionszulagen oder Output-Subventionen in Abhängigkeit eines effizienten Stands der Anlagentechnik geleistet werden.

Wärmebereitstellung durch Biomasse in Gebäuden nur übergangsweise fördern

Die Wärmebereitstellung in Gebäuden erfolgt am effizientesten in Kombination mit der Stromerzeugung über die Kraft-Wärme-Kopplung sowie langfristig mit Wärmepumpen, die mit regenerativem Strom betrieben werden. Hohe Infrastrukturinvestitionen in das Fern- und Nahwärmenetz lassen die Nutzung von Holz-, Hackschnitzel- und Pelletheizungen besonders im ländlichen Raum als Übergangslösung angebracht erscheinen. Aufgrund ausgeprägter Beharrungswiderstände besonders bei privaten Haushalten selbst gegenüber technisch effizienten und wirtschaftlich lohnenden Verbrennungstechnologien kann neben ordnungsrechtlichen Auflagen eine Förderung durch vergünstigte Darlehen oder Investitionszulagen bei der Umstellung auf effiziente Biomasse-Heizanlagen sinnvoll sein. Soweit noch keine strengen Auflagen für Feinstaubemissionen gelten, sind diese parallel zur Förderung einzuführen und umzusetzen.

Stoffliche Nutzung von Biomasse strategisch gestalten

Zur Ableitung von Strategien zur stofflichen Nutzung von Biomasse aus Land- und Forstwirtschaft sollte eine Stoffstromanalyse erstellt werden, die den Status Quo auf nationaler und globaler Ebene erfasst (Herstellung, Nutzung, Recycling und Entsorgung; jeweils auch Im- und Exporte) und dabei auch die globale Flächeninanspruchnahme bilanziert. In Szenarien sollten absehbare Entwicklungen und Handlungsoptionen beschrieben werden (zunehmende Konkurrenz zwischen energetischer und stofflicher Nutzung und zwischen landwirtschaftlicher und forstwirtschaftlicher Ressourcenbasis; Perspektiven des Ersatzes erdölbasierter Produkte wie Kunststoffe, Schmierstoffe oder Bitumen; Kohlenstoffbindung durch langlebige Holzprodukte; Kaskadennutzung von biogen erzeugten Produkten mit abschließender energetischer Nutzung). Für zentrale Stoff- und Produktkategorien wie etwa Zellstoff und Papierprodukte sollten vergleichbar wie bei Bioenergie Nachhaltigkeitsstandards für den Anbau und die Gewinnung der Rohstoffe festgelegt werden und Produktstandards mit hohen Recylingquoten gesetzt werden. Durch geeignete Maßnahmen sollten der hohe Ressourcen- und Produktverbrauch massiv gesenkt werden.

Internationales Abkommen über (Bio) Energiesubventionen initiieren

Eine Subventionierung der Bioenergie als eine Form erneuerbarer Energien ist im Kontext mit anderen Energiesubventionen, insbesondere mit Subventionen für fossile Energien, zu sehen. Im Hinblick auf eine nachhaltige Energiewende sollten nationale Förderpolitiken zur Energieproduktion und -nutzung umgebaut werden und Nachhaltigkeitskriterien ein stärkeres Gewicht bekommen. Dies gilt sowohl für die Förderpolitik der Industrie- als auch der Schwellenländer. Nach Meinung des WBGU kann ein solcher Politikwechsel am ehesten dann ohne bedeutende Wettbewerbseffekte umgesetzt werden, wenn die Staaten den Abbau nichtnachhaltiger Energiesubventionen gemeinsam angehen und auf internationaler Ebene koordinieren sowie Prinzipien zur Zulässigkeit von Energiesubventionen vereinbaren, die sich an Nachhaltigkeitszielen orientieren. Dies könnte im Rahmen von Verhandlungen über ein Multilateralen Energiesubventionsabkommens (MESA) geschehen. Ein solches Abkommen, das zunächst plurilateralen Charakter hätte und zumindest die wichtigsten Energie produzierenden oder verbrauchenden Länder erfassen sollte, könnte langfristig im WTO-Regelwerk verortet werden.

12.5 Nachhaltiges Bioenergiepotenzial in Entwicklungs- und Schwellenländern nutzen

Die traditionelle Biomassenutzung stellt die Grundlage zum Kochen und zur Wärmeerzeugung für noch immer ca. 2,5 Mrd. Menschen dar. Durch den Einsatz kostengünstiger und einfacher Technologien kann die Effizienz der traditionellen Biomassenutzung signifikant erhöht und die wirtschaftliche und gesundheitliche Situation vieler Menschen verbessert werden. Zwar sind in der internationalen Entwicklungszusammenarbeit bereits eine Vielzahl von Programmen realisiert worden, von einer flächendeckenden Lösung des Problems ist man noch weit entfernt. Viele Entwicklungsländer hoffen zudem, vom Energiepflanzenanbau profitieren zu können. Der WBGU leitet aus seiner umfassenden Analyse Empfehlungen für den Umgang mit Bioenergie ab, die dazu beitragen sollen, die in dem Gutachten herausgearbeiteten Chancen der Bioenergie umfassend in den Entwicklungsländern zu mobilisieren und zugleich die nicht unerheblichen Risiken, vor allem des Energiepflanzenanbaus, zu minimieren.

Bekämpfung der Energiearmut entwicklungspolitische Priorität einräumen

Da Entwicklung maßgeblich vom Zugang zu Energie abhängt, liegen in der lokalen Produktion und Nutzung von Bioenergie große Chancen, insbesondere für Armutsbekämpfung und ländliche Entwicklung. Daher scheint es zunächst sinnvoll, die Bekämpfung der Energiearmut explizit in den Milleniumsentwicklungszielen zu verankern, wie es das UN-Millenniumsprojekt (2005) vorschlägt. Hierzu wird kein neues Millenniumsziel benötigt, der Zugang zu Energie sollte als Mittel zur Armutsbekämpfung und zur Verbesserung der Lebensbedingungen aufgenommen werden. Außerdem empfiehlt der WBGU als internationale Zielsetzung, den Ausstieg aus den gesundheitsschädlichen Formen der traditionellen Bioenergienutzung bis 2030 vollständig umzusetzen (WBGU, 2003a). Dazu muss die Bekämpfung der Energiearmut in den energiepolitischen Portfolios der Akteure der internationalen Entwicklungszusammenarbeit stärker verankert werden. Als ein erster Schritt ist es notwendig, die Bekämpfung der Energiearmut in Poverty Reduction Strategy Papers (PRSP) systematisch zu integrieren. Die internationale Gemeinschaft sollte Bioenergieprojekte besonders fördern, die der netzunabhängigen, ländlichen Energieversorgung in Entwicklungsländern dienen. In diesem Zusammenhang begrüßt der WBGU die neue Afrika-EU Energie Partnerschaft, die sich zum Ziel gesetzt hat, Elektrifizierung und Kapazitätsaufbau in Afrika voranzubringen (EU-Kommission, 2008c).

Strategien auf länderübergreifende Querschnittsevaluierungen und lokale Untersuchungen gründen

Eine entwicklungspolitische Strategie zur Überwindung der Energiearmut muss daran ansetzen, mögliche Alternativen zur Bereitstellung von Energiedienstleitungen zu prüfen, die Hemmnisse besser zu verstehen und zu überwinden. Darauf aufbauend müssen die Prioritäten der Entwicklungszusammenarbeit entsprechend neu geordnet werden. Einzelne Programme – beispielsweise der Asian Development Bank oder der GTZ – zielen inzwischen in diese Richtung. Zur Entwicklung geeigneter Strategien sind länderübergreifende Querschnittsevaluierungen notwendig, um Hinweise auf Best-practice-Ansätze zu erhalten. Allerdings ist es zur Verbreitung neuer Technologien, die auf Biomasse basieren können, unbedingt notwendig, im großen Stil national, regional und lokal spezifische Untersuchungen der Möglichkeiten und Hemmnisse durchzuführen. Bisher sind nur sehr eng begrenzte Einzelfallanalysen vorhanden. Auf dieser erweiterten Datengrundlage sollten die Akteure der Entwicklungszusammenarbeit in Zusammenarbeit mit nationalen Institutionen und Entscheidungsträgern sowie den Betroffenen die Bewusstseinsbildung und Akzeptanz in diesem Bereich stärken, diese in geeignete politische Strategien einbetten sowie vor Ort den Ersatz der traditionellen Bioenergienutzung entschieden vorantreiben. Die Verbreitung verbesserter Holz- und Holzkohleherde kann hier nur einen allerersten Schritt darstellen.

Entwicklungsländern bei der Konzeption nationaler Bioenergiestrategien unterstützen

Um die Chancen und Entwicklungspotenziale der Bioenergie realistisch einschätzen und etwaige Risiken minimieren zu können, empfiehlt der WBGU vorrangige strategische Fragen im Länderkontext und unter möglichst breiter Beteiligung betroffener Interessens- und Bevölkerungsgruppen zu diskutieren. Dabei ist zu klären, welche Ziele vorrangig mit der Förderung von Bioenergie erreicht werden sollen. In einer nationalen Bioenergiestrategie sollten alle Nutzungs- und Anwendungsformen der Bioenergie geprüft und hinsichtlich ihrer Eignung für die lokale Situation abgewogen werden. Da Bioenergie nur eine von vielen Möglichkeiten darstellt, die oben genannten Ziele zu erreichen, müssen parallel Alternativen beachtet werden. Hierfür bedürfen Entwicklungs- und Schwellenländer länderspezifischer Strategien, die eine systematische Überprüfung der Zielsetzung und agroökologischen, sozioökonomischen Voraussetzungen sowie eine Abschätzung der institutionellen Kapazitäten ermöglichen (siehe Entschei-

dungshilfe und Kernelemente), um so einen nachhaltigen Anbau sicherstellen. Die Entwicklungszusammenarbeit sollte die Partnerländer in ihrer Strategiebildung unterstützen und auf eine Einhaltung der Mindeststandards und Förderkriterien hinwirken. Dafür sollten die notwendigen Governance-Kapazitäten wie Landnutzungsplanung, Zertifizierung usw. zur Gestaltung einer nachhaltigen Bioenergienutzung gestärkt werden. So kann unterstützt werden, dass die Regionen, die über ein nachhaltiges Potenzial für den Anbau von Energiepflanzen verfügen, wie z.B. Lateinamerika und Subsahara-Afrika, ihre Potenziale nachhaltig realisieren können.

Ernährungssicherungs- und Bioenergiestrategien verknüpfen

Vor allem der Energiepflanzenanbau ist mit großen Risiken behaftet. Dies gilt insbesondere für Entwicklungsländer, die unter hoher Ernährungsunsicherheit leiden. Ein klima- und energiepolitisch motivierter nennenswerter Ausbau der Bioenergiepolitik ist nur dann vertretbar, wenn dies gleichzeitig mit einer Ernährungssicherungsstrategie in den jeweiligen Ländern verbunden wird.

Standards bei der programm- und projektgebundenen Kreditvergabe berücksichtigen

Multilaterale Entwicklungsbanken und internationale Finanzierungsinstitutionen verfügen mittels ihrer Programme und Projekte in Entwicklungsländern über einen Hebel zur Förderung nachhaltiger Entwicklung in ihren Partnerländern. Dies sollte im Zusammenhang mit Energiepflanzen dadurch genutzt werden, dass Mindeststandards für Bioenergieträger bei der Vergabe von Projekten und Krediten begünstigend berücksichtigt werden oder dass Projektteile zur Unterstützung bei der Einhaltung der vom WBGU empfohlenen Mindeststandards vorgesehen werden.

Pilotprojekte mit besonders nachhaltigen Anbausystemen fördern

Während die Einhaltung der Mindeststandards eine Grundvoraussetzung für die Produktion von Bioenergieträgern sein sollte, empfiehlt der WBGU insbesondere im Rahmen der EZ Anbaumethoden, die besonders nachhaltig sind und Beiträge zur Erosionsbekämpfung und Biodiversitätserhaltung sowie zur (Energie-)Armutsreduzierung und ländlichen Entwicklung beitragen, in Pilotprojekten zu fördern (Förderkriterien: Kap. 10.3). Das betrifft auch zu zertifizierende Anbausysteme für den überregionalen Markt oder den Export. Dazu zählen vor allem der sozialverträgliche Anbau geeigneter mehrjähriger Energiepflanzen auf degradierten Flächen oder Waldfeldbau-Systeme. Dadurch können neue landwirtschaftliche Praktiken eingeübt und beste Anwendungen identifiziert und etabliert werden. Die Pilotprojekte sollten Teil einer Gesamtstrategie zur Verbesserung der landwirtschaftlichen Praxis sein und die Betroffenen vor Ort in einem gemeinsamen Entscheidungsprozess einbeziehen.

Nutzung von Abfall- und Reststoffen insbesondere bei der Stromerzeugung fördern

In stark landwirtschaftlich geprägten Ländern fallen erhebliche Mengen an Reststoffen an (z.B. Fischwirtschaft, Sägewerke, Tee-, Kaffee- und Zuckerplantagen), die energetisch genutzt werden können. Vor allem agroindustrielle Biogasanlagen und Heizkraftwerke sind für die Verwertung der Reststoffe geeignet, die idealerweise die Abwärme der Stromerzeugung in den Herstellungsprozess ihrer Produkte einbinden (z.B. Trocknung). Der WBGU empfiehlt, dass diese Potenziale bei der Erstellung nationaler Bioenergiestrategien länderspezifisch geprüft und entsprechend berücksichtigt werden. Die technische und finanzielle Zusammenarbeit kann hier wertvolle Unterstützung leisten. In Pilotvorhaben sollte die Mobilisierung und Nutzung von Abfall- und Reststoffen unterstützt und beste Anwendungen identifiziert werden.

Verbesserung des Zugangs zu Energiedienstleistungen und Transformation der Energiesysteme unterstützen

Um eine flächendeckende Versorgung der Bevölkerung mit Energiedienstleistungen zu gewährleisten und Entwicklungsländern bei Transformation der Energiesysteme zu unterstützen sollte eine Vielzahl von Instrumenten genutzt werden. Der WBGU empfiehlt, öffentliche und privatwirtschaftliche Elemente zu kombinieren. Auf der Nachfrageseite geht es darum, die Kaufkraft der von Energiearmut betroffenen zu erhöhen. Die Entwicklungszusammenarbeit sollte daher Mikrofinanzierungssysteme weiter finanziell unterstützen. Mikrofinanzierung kann insbesondere in ländlichen Gebieten sowohl für private Haushalte als auch für Klein- und Kleinstbetriebe zur verbesserten Versorgung beitragen (WBGU, 2003a). Mikrofinanzierungssysteme können auch dazu dienen, die vom WBGU als förderungswürdig eingeschätzten Technologien zum Ersatz der traditionellen Bioenergienutzung zu finanzieren. Um zusätzliche Mittel und Know-How zu generieren, sollten auch privates Kapitel mobilisiert werden. Dazu sollten Kooperationen zwischen dem privaten und dem öffentlichen Sektor gefördert werden. Auch im Bereich Energiepflanzenanbau, z.B. *Jatropha*, gibt

es Beispiele für erfolgreiche Kooperationen (Altenburg et al., 2008). Auch eine Zulassung von kleinskaligen CDM-Projekten zur Effizienzverbessung bei der traditionellen Bioenergienutzung ist begründbar und kann die Finanzierung unterstützen. Auch zur großskaligen Substitution fossiler Brennstoffe könnten CDM-Projekte verstärkt genutzt werden (Kap. 10.2.3).

Bioenergiepartnerschaften knüpfen

Eine multilaterale Zusammenarbeit zur nachhaltigen Bioenergieproduktion und -nutzung kann durch spezifische zwischenstaatliche Partnerschaften ergänzt werden. Diese Partnerschaften haben zum einen den Charakter bisheriger Technologieabkommen oder -partnerschaften, wie sie zwischen Industrieländern und/oder Schwellenländern in Bezug auf Technologietransfer und gemeinsamer Technologieentwicklung und –verbreitung in anderen Energiebereichen bereits existieren (Gupta et al, 2007; Philibert, 2004). Technologie orientierte Partnerschaften zwischen Industrie- und Schwellenländern könnten z.B. zur Verbreitung von Technologien der Biomethanaufbereitung und -verwendung ins Auge gefasst werden. Zum anderen können reine Technologienpartnerschaften zur Bioenergie mit Aspekten einer nachhaltigen Landnutzungspolitik verknüpft werden. Gleiches gilt für Handelspartnerschaften. Hier könnten Anbieter- und Nachfragerländer von Bioenergieträgern auf bilateraler Basis Vereinbarungen treffen, wonach die Produktion von Bioenergieträgern mit Kriterien einer regional nachhaltigen Landnutzung verbunden wird. Anbieterländer würden sich dazu verpflichten, Nachhaltigkeitsstandards bei der Produktion einzuhalten. Nachfragerländer würden im Gegenzug Technologien oder spezialisiertes Wissen zu Anbaussystemen zur Verfügung stellen. Zusätzlich sollten den nachhaltig produzierten Bioenergieträgern aus den Partnerländern ein ungehinderter Marktzugang einräumt werden. Es ist positiv zu bemerken, dass die Bundesregierung beabsichtigt Vereinbarungen zu treffen, wonach Importerleichterungen aus den Entwicklungsländern gewährt werden, die einen nachhaltigen Anbau gewährleisten (BMU, 2008e).

Umbau des Weltenergiesystems energisch vorantreiben

Der WBGU zeigt, wie Bioenergie je nach Zielsetzung und Struktur in den Energiesystemen von Entwicklungsländern nachhaltig eingesetzt werden kann. Neben ihrem verbesserten Einsatz im kleinskaligen Bereich – zur lokalen Energieversorgung, auf Haushalts- und Dorfebene sowie in Kleinbetrieben – kann Bioenergie grundsätzlich auch einen wichtigen Beitrag zur Modernisierung der Energiesektoren im urbanen-industriellen Kontext leisten. Die dazu empfohlenen Technologien, angefangen bei verbesserten Herden über Kleinbiogasanlagen, Blockheizkraftwerke, KWK, GuD-Kraftwerke, Elektromobilität usw., dienen nicht nur der Bekämpfung der Energiearmut, sondern auch dem Klimaschutz. Die Koordinierung und Unterstützung des Umbaus des Weltenergiesystems sollte deshalb durch die internationale Gemeinschaft erfolgen (Kap. 12.6; WBGU, 2003a). Im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit sollte die Weltbankgruppe, als eine einflussreiche und finanzkräftige Akteurin, eine umfassende Strategie entwickeln, wie sie zum nachhaltigen Umbau des Weltenergiesystems beitragen kann. Der WBGU empfiehlt, dass sich die Bundesregierung auf europäischer Ebene und in den Aufsichtsgremien der betreffenden internationalen Organisationen an die Spitze eines solchen Prozesses stellt, um ihrer Vorreiterrolle beim Klimaschutz gerecht zu werden. Ein erster Schritt kann die Einberufung einer Internationalen Konferenz zur nachhaltigen Bioenergienutzung sein, um die internationale Aufmerksamkeit für die Wechselwirkungen zwischen Bioenergie und nachhaltiger Entwicklung aufrecht zu erhalten und zu schärfen (Kap. 10.7.7.2).

12.6 Strukturen für eine nachhaltige globale Bioenergiepolitik schaffen

Bioenergie durch die Internationale Agentur für Erneuerbare Energien (IRENA) fördern

Die notwendige Transformation globaler Energiesysteme erfordert ein koordiniertes Vorgehen auf globaler Ebene und damit die Bündelung internationaler Institutionen und Akteure. Daher begrüßt der WBGU die Entwicklung zur Gründung einer IRENA, deren Ziel die Förderung des weltweiten Einsatzes von erneuerbaren Energien durch Politikberatung, Technologietransfer sowie die Förderung von Kompetenzerwerb und Wissenstransfer ist. Allerdings verlangt das Ansteuern einer globalen Energiewende, dass neben erneuerbaren Energien die Gesamtheit der Energiesysteme, die Energienachfrage sowie entwicklungspolitische Aspekte, in das Förderkonzept einbezogen werden. Die IRENA sollte Energie-, Umwelt- und Entwicklungsfragen integriert bearbeiten. Die beschriebenen Energie-Entwicklungspfade (Kap. 8) und Fördergrundsätze für eine nachhaltige Bioenergie (Kap. 10.7) bieten eine gute Orientierungshilfe für Bioenergie-spezifische Beratungs- und Förderleistungen.

Ein globales Landnutzungskataster aufbauen

Eine wichtige Voraussetzung für das Monitoring von direkten und indirekten Landnutzungsänderungen bei der Einführung eines Standards und der erforderlichen Zertifizierungssysteme ist die Erarbeitung eines globalen, GIS-gestützten Landnutzungs-katasters, das auf gut aufgelöste Satellitendaten sowie Landnutzungsinformationen zurückgreifen kann. Als wichtiger Baustein hierfür ist der rasche Ausbau der Weltdatenbank über Schutzgebiete des UNEP-WCMC zu empfehlen, um die Frage zu beantworten, ob eine bestimmte Ware innerhalb oder außerhalb eines Schutzgebiets produziert wurde. Das globale Landnutzungskataster muss aber darüber hinausgehen und in der Lage sein, für jeden importierten Bioenergieträger Auskunft über die entsprechende Produktionsfläche zu geben (geographische Koordinaten, Art des Anbaus, Selbstver-pflichtung zur Einhaltung aller Kriterien usw.). Mit diesen Informationen könnte man bereits unter standardisierter Zuhilfenahme des Landnutzungskatasters Plausibilitätsprüfungen durchführen. Diese Angaben müssten dennoch durch stichpunktartige Vor-Ort-Kontrollen sowie die Auswertung von Satellitendaten ergänzt werden.

Multilaterale Ansätze zur Globalisierung von Standards verfolgen

Die Möglichkeit, Standards für Bioenergie auch in einem multilateralen Rahmen zu entwickeln und zu institutionalisieren, ist die aus handelsrechtlicher Sicht bevorzugte Option und sollte genutzt werden. Die Bundesregierung sollte sich dafür einsetzen, dass möglichst rasch ein internationaler Konsens zu einem Mindeststandard für nachhaltige Bioenergieproduktion sowie zu einer umfassenden, internationalen Bioenergiestrategie entwickelt wird. Aus Sicht des WBGU läge ein erfolgversprechender Ansatz im Ausbau bestehender internationaler Initiativen, insbesondere der „Global Bioenergy Partnership“ (GBEP) im Rahmen der G8+5. GBEP ist ein wichtiges Vehikel, um die multilaterale Politikformulierung zu beschleunigen. Es bringt zentrale Akteure zusammen und bindet Schwellenländer (vor allem Brasilien und Südafrika) ein, deren Interessen massiv betroffen sind. Allerdings wäre dabei darauf hinzuwirken, dass im Vergleich zur heutigen Arbeitsweise zivilgesellschaftliche Akteure verstärkt einbezogen werden, so dass der Diskurs unter Einbeziehung aller Betroffenen erfolgt. GBEP bzw. die Task Force on Sustainability sollte darin unterstützt werden, als zwischenstaatliches Forum die vielfältigen formellen und informellen Prozesse zur Erarbeitung globaler Nachhaltigkeitskriterien zu bündeln und auf die Erarbeitung globaler Standards und Richtlinien hinzuwirken. Die Vorschläge des Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB) könnten eine Grundlage für diesen, an politische Entscheidungsträger angebundenen Prozess der Standardsetzung bilden und sollten in die Arbeit der Task Force eingebracht werden. Unter der politischen Führung der G8 könnte erreicht werden, dass die Entscheidungen in politikrelevante Foren, Institutionen und Prozesse eingebracht werden und dass deren Implementierung gewährleistet ist.

Globale Kommission für nachhaltige Landnutzung einsetzen

Der Beirat hält es angesichts der Herausforderung an das Landnutzungsmanagement für notwendig, die Frage der globalen Landnutzung auf internationaler Ebene stärker zu thematisieren und institutionell zu verankern. Zur Organisation dieses internationalen „Suchprozesses“ sollte eine neue globale Kommission für nachhaltige Landnutzung eingerichtet werden. Die Aufgabe der Kommission soll darin bestehen, die wichtigen Herausforderungen im Themenkomplex der globalen Landnutzung zu identifizieren und den Stand des Wissens zusammenzutragen. Darauf aufbauend sollte die Kommission, Grundlagen, Mechanismen und Leitlinien zum globalen Landnutzungsmanagement erarbeiten. Die neue Kommission für nachhaltige Landnutzung, deren Zuständigkeit weit über Fragen der Landnutzung im engeren Sinne hinausgeht, könnte bei UNEP angegliedert werden und in enger Zusammenarbeit mit anderen UN-Organisationen, etwa der FAO, stehen. Die Ergebnisse des Prozesses sollten regelmäßig auf die internationale Agenda gesetzt werden. Dies könnte etwa im Rahmen des Globalen Umweltministerforum des UNEP erfolgen. Noch wichtiger wäre jedoch die Vorstellung und Diskussion der Thematik innerhalb des strategisch wichtigen Forums der Staats- und Regierungschefs (G8+5).

International Conference on Sustainable Bioenergy einberufen

Nachhaltige Bioenergiestrategien sind in einer sich zunehmend globalisierenden Welt besser umzusetzen, wenn international ein gemeinsames Verständnis über die Chancen und Risiken der Bioenergie sowie ein Konsens über angemessene Normen bezüglich der Produktion und der Nutzung unterschiedlicher Formen der Bioenergie besteht. Beides kann nur durch eine internationale Kooperation bei der Formulierung von Zielen und Prinzipien erreicht werden. Akteure aus den Bereichen der Agrar-, Energie- und Entwicklungspolitik müssen dafür zusammenkommen. Diesem Zweck würde eine “International Conference on Sustainable Bioenergy” dienen, die nach dem Vorbild der renewables 2004 ausgestal-

tet sein könnte und auf der Ideen für Best-practice-Ansätze ausgetauscht, allgemeine Förderprinzipien formuliert und Vereinbarungen zur internationalen Bioenergiezusammenarbeit getroffen werden könnten, wie etwa Zusagen zur Förderung des Anbaus von Bioenergiepflanzen auf degradierten Flächen oder Vereinbarungen zu Bioenergiepartnerschaften. Der WBGU empfiehlt der Bundesregierung, Schritte für eine zeitnahe Einberufung einer Konferenz zu unterstützen.

Literatur 13

Abengoa (2006): Greencell Abengoa Bioenergy: Description of ‚Thermal Integration' and ‚Maximum Production' Concepts on EF Ethanol Production. Internes Dokument. Sevilla: Abengoa.

ABN – African Biodiversity Network (2007): Agrofuels in Africa – The Impacts on Land, Food and Forests. Case Studies from Benin, Tanzania, Uganda and Zambia. Nairobi: ABN.

Adams, R. M., Fleming, R. A., Chang, C.-C., McCarl, B. A. und Rosenzweig, C. (1995): A reassessment of the economic effects of global climate change on U.S. agriculture. Climatic Change 30 (2), 147–167.

ADB – Asian Development Bank (2007a): Climate Change – ADB Programms – Strengthening Mitigation and Adaptation in Asia and the Pacific, Manila. Internet: http://www.adb.org/Documents/Brochures/Climate-Change/default.asp (gelesen am 07. Mai 2008). Metro Manila, Philippines: ADB.

ADB – Asian Development Bank (2007b): Biofuel and Rural Renewable Energy Initiative in the Greater Mekong Subregion. Internet: http://www.adb.org/documents/brochures/gms-biofuel/gms-biofuel-brochure.pdf (gelesen am 07. Mai 2008). Metro Manila, Philippines: ADB.

ADB – Asian Development Bank (2008a): Response to Query on Bioenergy, Memorandum – Regional and Sustainable Development Department, 30 June 2008. Antwort an den WBGU auf Anfrage an den Executive Director für Deutschland Sebastian Paust. unveröffentlichtes Dokument.

ADB – Asian Development Bank (2008b): Making Markets Work Better for the Poor – Market-Based Approaches to Low Carbon Development in Vietnam Domestic Biogas and CDM Financing – Possibilities and Problems. Internet: http://www.markets4poor.org/?name=home&id=140 (gelesen am 18. September 2008). Hanoi: ADB.

Adelphi Consult und Wuppertal Institut (2007): Die sicherheitspolitische Bedeutung erneuerbarer Energien. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Endbericht – FKZ 904 97 324. Berlin: Adelphi Consult.

Adler, P. R., Del Grosso, S. J. und Parton, W. J. (2007): Life-cycle assessment of net greenhouse-gas flux for bioenergy cropping systems. Ecological Applications 17, 675–691.

AfDB – African Development Bank (2007): Renewable Energy Takes Centre Stage in Africa's Development Efforts. Internet: http://www.afdb.org/portal/page_pageid=293,158705&_dad=portal&_schema=PORTAL&focus_item=22812297&focus_lang=us (gelesen am 08. Mai 2008). Tunis, Tunesien: AfDB.

Ahmann, M. (2000): Primary Energy Efficiency of Alternative Powertrains in Vehicles. Lund: Department of Environmental and Energy System Studies, Lund University.

Al-Kaisi, M. M. und Grotte, J. B. (2007): Cropping systems effects on improving soil carbon stocks of exposed subsoil. Soil Science Society of America Journal 71, 1381–1388.

Alongi, D. M. und de Carvalho, N. A. (2008): The effect of small-scale logging on stand characteristics and soil biogeochemistry in mangrove forests of Timor Leste. Forest Ecology and Management 155, 1359–1366.

Alpmann, L. (2005): Ist die Produktion von Raps in Deutschland noch steigerunsfähig? Rapool. Pressegespräch. Internet: http://www.rapool.de/index.cfm/startid/133/doc/292//cfid/1466506/cftoken/62397577.html (gelesen am 27. Februar 2008). Isernhagen: Rapool.

Altenburg, T., Dietz, H., Hahl, M., Nikolidakis, N., Rosendahl, C. und Seelige, K. (2008): Biodiesel Policies for Rural Development in India. Preliminary Report. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE).

Altenburg, T. und von Drachenfels, C. (2007): Creating an Enabling Environment for Private Sector Development in Sub-Saharan Africa. Paper Commissioned by BMZ/GTZ and UNIDO and Presented to the Donor Committee for Enterprise Development at the Africa Regional Consultative Conference on „Creating Better Business Environments for Enterprise Development – African and Global Lessons for More Effective Donor Practices" 05–07 November 2007, Accra, Ghana. Bonn: German Development Institute.

Althammer, W., Biermann, F., Dröge, S. und Kohlhaas, M. (2001): Ansätze zur Stärkung der umweltpolitischen Ziele in der Welthandelsordnung. Berlin: Analytica.

Antle, J., Cabalbo, S., Mooney, S., Elliott, E. und Paustian, K. (2003): Spatial heterogeneity, contract design, and the efficiency of carbon sequestration policies for agriculture. Journal of Environmental Economics and Management 46, 231–250.

Aravind, P. V., Ouweltjes, J. P., de Heer, E., Woudstra, N. und Rietveld, G. (2006): Impact of Biosyngas and its Components on SOFC Anodes: Proceedings of the 9th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells, May 15–20, 2005. Washington, DC: U.S. Department of Energy.

Asner, G. P., Broadbent, E. N., C., O. P. J., Keller, M., Knapp, D. E. und Silva, J. N. M. (2006): Condition and fate of logged forests in the Brazilian Amazon. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 103, 12947–12950.

Augustus, G. D. P. S., Jayabalan, M. und Seiler, G. J. (2002): Evaluation and bioinduction of energy components of Jatropha curcas. Biomass and Bioenergy 23, 161–164.

Badgley, C., Moghtader, J., Quintero, E., Zakem, E., Chappell, M. J., Avilés-Vázquez, K., Samulon, A. und Perfecto, I. (2007): Organic agriculture and the global food supply. Renewable Agriculture and Food Systems 22 (2), 86–108

Baehr, H. D. (1965): Energie und Exergie: Die Anwendung des Exergiebegriffs in der Energietechnik. Düsseldorf, Berlin: Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag GmbH.

Baehr, H. D. und Kabelac, S. (2006): Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L. und Schaepman, M. E. (2008): Global Assessment of Land Degradation and Improvement. 1. Identification by Remote Sensing. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Baillie, J. E. M., Hilton–Taylor, C. und Stuart, S. N. (2004): 2004 IUCN Red List of Threatened Species. A Global Species Assessment. Gland: The IUCN Species Survival Commission.

Baldocchi, D. (2008): Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. Australian Journal of Botany 56, 1–26.

Balmford, A., Bruner, A., Cooper, P., Costanza, R., Farber, S., Green, R. E., Jenkins, M., Jefferiss, P., Jessamy, V., Madden, J., Munro, K., Myers, N., Naeem, S., Paavola, J., Rayment, M., Rosendo, S., Roughgarden, J., Trumper, K. und Turner, R. K. (2002): Economic reasons for conserving wild nature. Science 297 (9.8.03), 950–953.

Balmford, A., Green, R. S. und Scharlemann, J. P. W. (2005): Sparing land for nature: exploring the potential impact of changes in agricultural yield on the area needed for crop production. Global Change Biology 11 (10), 1594–1605.

Baret, S., Le Bourgeois, T., Rivière, J.-N., Pailler, T., Sarrailh, J.-M. und Strasberg, D. (2007): Can species richness been maintained in logged endemic Acacia heterophylla forests (Réunion Island, Indian Ocean)? Revue d'Ecologie Terre et Vie 62, 273–284.

Batjes, N. H. (1998): Mitigation of atmospheric CO_2 concentrations by increased carbon sequestration in the soil. Biology and Fertility of Soils 27, 230–235.

Bauer, S. (2007): Sicherheitsrisiko Klimawandel. Entwicklung & ländlicher Raum 41 (5), 9–12.

Bauer, S. (2008): „Admit that the waters around you have grown". Die Bedeutung des Klimawandels für die Vereinten Nationen. Vereinte Nationen 56 (1), 3–9.

Bauer, S. und Stringer, L. C. (2008): Science and Policy in the Global Governance of Desertification: An Analysis of Institutional Interplay Under the United Nations Convention to Combat Desertification. Global Governance Working Paper 35. Amsterdam: The Global Governance Project.

Baumann, M., Laue, H.-J. und Müller, P. (2006): Wärmepumpen – Heizen mit Umweltenergie, BINE Informationspaket. Berlin: Solarpraxis AG.

Bayer CropScience (2006): Volle Kraft vom Acker. Kurier: Das Bayer CropScience Magazin für moderne Landwirtschaft Nr. 3. Leverkusen: Bayer CropScience.

BayLfU – Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) (2004): Biogashandbuch Bayern – Materialienband. Augsburg: BayLfU.

Beese, F. (2004): Ernährungssicherung als Produktions– bzw. Verteilungsproblem. Externe Expertise für das Hauptgutachten "Welt im Wandel: Armutsbekämpfung durch Umweltpolitik". Internet: http://www.wbgu.de/www.wbgu_jg2004_ex01.pdf Berlin: WBGU.

Bensmann, M. (2004): Alles verfeuert. Altholz ist inzwischen ein beliebter Brennstoff. Neue Energie 9, 52.

Bensmann, M. (2008): Husch, husch ins Netz. Biogas ist ein universeller Energieträger, der in Erdgasqualität sogar ins Gasnetz eingespeist werden darf. Neue Energie 5, 64–69.

Beringer, T. und Lucht, W. (2008): Simulation nachhaltiger Bioenergiepotentiale – Übersicht. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten "Welt im Wandel: Bioenergie und nachhaltige Landnutzung". Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex01.pdf. Berlin: WBGU.

Berndes, G. (2002): Bioenergy and water – the implications of large–scale bioenergy production for water use and supply. Global Environmental Change 12, 253–271.

Berndes, G. (2008): Water Demand for Global Bioenergy Production: Trends, Risks and Opportunities. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten "Welt im Wandel: Bioenergie und nachhaltige Landnutzung". Internet: http://www.wbgu.de_wbgu_jg2008_ex02.pdf Berlin: WBGU.

Berndes, G., Hoogwijk, M. und van den Broek, R. (2003): The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. Biomass & Bioenergy 25 (1), 1–28.

Bhattacharya, S. C. und Salam, P. A. (2002): Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries Biomass and Bioenergy 22, 305–317.

BHD – Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, E.-u. U. (2008): Erdgas-Brennwerttechnik. Internet: http://www.bdh-koeln.de/html/service_produkte/gas_brennwerttechnik.php?lng=de (gelesen am 18. September 2008). Köln: BHD.

Biermann, F. und Bauer, S. (2004): UNEP und UNDP. Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten "Welt im Wandel: Armutsbekämpfung durch Umweltpolitik". Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2004_ex02.pdf Berlin: WBGU.

Biofuelwatch, Carbon Trade Watch, Corporate Europe Observatory, Econexus, Ecoropa, Grupo de Reflexion Rural, Munlochy Vigil, NOAH – Friends of the Earth Denmark, Rettet den Regenwald und Watch Indonesia (Hrsg.) (2007): Agrofuels. Towards a Reality Check in Nine Key Areas. Amsterdam: Transnational Institute (TNI).

Biopact (2006): Indonesia's Biofuels Program Seen as a Way to Alleviate Poverty. Artikel vom 30. Juli 2006. Internet: http://biopact.com/2006_07_30_archive.html (gelesen am 27. November 2007). Heverlee, Belgien: Biopact.

Biopact (2007a): Senegal and Brazil Sign Biofuel Agreement to Make Africa a Major Supplier. Internet: http://www.biopact.com/2007/05/senegal-and-brazil-sign-biofuel.html (gelesen am 18. Juni 2008). Heverlee, Belgien: Biopact.

Biopact (2007b): Indonesia and Brazil Sign Agreement to Cooperate on Biofuels. Internet: http://www.biopact.com/2007/03/indonesia-and-brazil-sign-agreement-to.html (gelesen am 18. Juni 2008). Heverlee, Belgien: Biopact.

BirdLife International (2008): Fuelling the Ecological Crisis – Six Examples of Habitat Destruction Driven by Biofuels. Brüssel: BirdLife International.

Biryetega, S. (2006): 2006 Country Reports – Uganda. Internet: http://www.globalintegrity.org/reports/2006/UGANDA/notebook.cfm (gelesen am 11. August 2008). Washington, DC: Global Integrity.

Bishop, J. (2007): Trading habitat: the potential of biodiversity offsets. AV 33. NN: NN.

Bishop, J. K. B. und Rossow, W. B. (1991): Spatial and temporal variability of global surface solar irradiance. Journal of Geophysical Research 96 (C9), 16839–16858.

Blüthner, A. (2004): Welthandel und Menschenrechte in der Arbeit. Frankfurt/M.: Lang.

BMELV – Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2006): Die EU-Agrarreform – Umsetzung in Deutschland. Berlin: BMELV.

BMELV – Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2008): Land und Forstwirtschaft in Deutschland. Daten und Fakten. Ausgabe 2008. Berlin: BMELV.

BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007a): Beitrag der erneuerbaren Energien zur Energiebereitstellung in Deutschland 2006. Internet: http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/39613/ (gelesen am 12. Dezember 2007). Berlin: BMU.

BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007b): Entwurf und Begründung einer Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige

Erzeugung von Biomasse zur Verwendung als Biokraftstoff (Biomasse-Nachhaltigkeitsverordnung – BioNachV). Internet: http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/40712.php Berlin: BMU.

BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008a): Fördergeld 2008 für Energieeffizienz und erneuerbare Energien. Programme – Ansprechpartner – Adressen. Berlin: BMU.

BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008b): Weiterentwicklung der Strategie zur Bioenergie. Berlin: BMU.

BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008c): Ökologische Industriepolitik. Nachhaltige Politik für Innovation, Wachstum und Beschäftigung. Berlin: BMU.

BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008d): Bundesumweltminister stoppt Biosprit-Verordnung. Biokraftstoffstrategie wird fortgesetzt. BMU-Pressedienst Nr. 052/08. Berlin: BMU.

BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008e): Life Web. Global Initiative on Protected Areas to be Launched at CBD COP 9 in Bonn. Berlin: BMU.

BMU (2008f): Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen (Entwurf und Begründung). Internet: http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/42435/4593/ (gelesen am 29. Oktober 2008). Berlin: BMU.

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2008): Energiezahlen. Berlin: BMWi.

BMZ – Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2008a): Die Rettung des Brasilianischen Regenwalds. Internet: http://www.bmz.de/de/themen/umwelt/projektschaufenster/brasilien.html (gelesen am 04. März 2008). Berlin: BMZ.

BMZ – Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2008b): Tropenwaldprojekte FZ und TZ i.w.S. aus dem Epl. 23 des BMZ. BMZ-Datenauskunftssystem. Bonn: BMZ.

BMZ – Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2008c): Entwicklungspolitische Positionierung zu Agrartreibstoffen. Diskussionspapier. Berlin: BMZ.

Boerrigter, H. und van der Drift, A. (2004): Biosyngas – Description of R&D Trajectory Necessary to Reach Large-Scale Implementation of Renewable Syngas From Biomass. Petten: Energy Research Centre of the Netherlands (ECN).

Bogner, J., Abdelrafie Ahmed, M., Diaz, C., Faaij, A., Gao, Q., Hashimoto, S., Mareckova, K., Pipatti, R. und Zhang, T. (2007): Waste management. In: Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R. und Meyer, L. A. (Hrsg.): Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge, New York: Cambridge University Press, 585–618.

Bolhár-Nordenkampf, M. (2004): Techno-Economic Assessment on the Gasification of Biomass on the Large Scale for Heat and Power Production. Dissertation. Wien: Technische Universität.

Bondeau, A., Smith, P. C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M. und Smith, B. (2007): Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. Global Change Biology 13 (3), 679–706.

Borges Silva, M., Kanashiro, M., Yamaguishi Ciampi, A., Thompson, I. und Sebbenn, A. M. (2008): Genetic effects of selective logging and pollen gene flow in a low-density population of the dioecious tropical tree Bagassa guianensis in the Brazilian Amazon. Forest Ecology and Management 255, 1548–1558.

Bormann, F. H. und Likens, G. E. (1979): Catastrophic disturbance and the steady-state in northern hardwood forests. American Scientist 67, 660–669.

Bounoua, L., deFries, R., Collatz, G. J., Sellers, P. und Khan, H. (2002): Effects of land cover conversion on surface climate. Climatic Change 52, 29–64.

BP – British Petroleum (2007): Statistical Review of World Energy 2007. Internet: http://www.deutschebp.de/genericarticle.docategoryId=9003692&contentId=7034169 (gelesen am 19. August 2008). London: BP.

BP – British Petroleum (2008): Statistical Review of World Energy 2008. London: BP.

BR – Bundesregierung (2007): Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung – Herausforderung und energie- und klimapolitische Zielsetzungen. Berlin: Bundesregierung.

Brandon, K., Redford, K. H. und Sanderson, S. E. (Hrsg.) (1998): Parks in Peril. People, Politics, and Protected Areas. Washington, DC: Island Press.

Bringezu, S., Ramesohl, S., Arnold, K., Fischedick, M., von Geibler, J., Liedtke, C. und Schütz, H. (2007): Towards a Sustainable Biomass Strategy. What we Know and What we Should Know. Wuppertal Papers 163. Wuppertal: Wuppertal Institut.

Bringezu, S. und Schütz, H. (2008): Auswirkungen eines verstärkten Anbaus nachwachsender Rohstoffe im globalen Maßstab. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 17 (2), 12–23.

Brock, N. (2008): Der Müll, die Stadt – und wer davon lebt. In Mexiko-Stadt ist Abfallbeseitigung ein Geschäft mit strengen Regeln. welt-sichten 4, NN.

Bruner, A. G., Gullison, R. E., Rice, R. E. und da Fonseca, G. A. B. (2001): Effectiveness of parks in protecting tropical biodiversity. Science 291 (05.01.01), 125–128.

Brüntrup, M. (2008): Steigende Lebensmittelpreise – Ursachen, Folgen und Herausforderungen für die Entwicklungspolitik. DIE Analysen und Stellungnahmen 4. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE).

Bryant, D., Nielsen, D. und Tangley, L. (1997): The Last Frontier Forests. Ecosystems & Economies on the Edge. Washington, DC: World Resources Institute (WRI).

BTG – Biomass Technology Group (2008): Sustainability Criteria & Certification Systems for Biomass Production. Final Report. Project No. 1386. Enschede: BTG.

Buchmann, N. und Schulze, E.-D. (1999): Net CO_2 and H_2O fluxes of terrestrial ecosystems. Global Biogeochemical Cycles 13, 751–760.

Butler, D. (2008): Food Crisis spurs research spending. Nature 453, 8.

BUWAL – Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (1999): Nationale Standards für die Waldzertifizierung in der Schweiz. Internet: http://www.fsc-schweiz.ch/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=40&lang=de (gelesen am 15. April 2008). Bern: BUWAL.

Calder, I. R. (1999): The Blue Revolution: Land Use and Integrated Water Resources Management. London: Earthscan.

Campbell, J. E., Lobell, D. B., Genova, R. C. und Field, C. B. (2008): The global potential of bioenergy on abandoned agriculture lands. Environmental Science & Technology 42 (15), 5791–5794.

Canadell, J. und Raupach, M. R. (2008): Managing forests for climate change mitigation. Science 320, 1456–1457.

Canadell, J. G., Le Quére, C., Raupach, M. R., Fielde, C. B., Buitenhuisc, E. T., Ciaisf, P., Conwayg, T. J., Gillettc, N. P.,

Houghton, R. A. und Marlandi, G. (2007): Contributions to accelerating atmospheric CO_2 growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. PNAS early edition, 5.

Carey, C., Dudley, N. und Stolton, S. (2000): Squandering Paradise? The Importance and Vulnerability fo the World's Protected Areas. Gland: WWF International.

Carroll, N., Fox , J. und Bayon, R. (2007): Conservation and Biodiversity Banking: A Guide to Setting up and Running Biodiversity Credit Trading Systems. Environmental Market Insights. London: Earthscan.

Castro-Arellano, I., Presley, S. J., Saldanha, L. N., Willig, M. R. und Wunderle jr., J. M. (2007): Effects of reduced impact logging on bat biodiversity in terra firme forest of lowland Amazonia. Biological Conservation 138, 269–285.

CBD – Convention on Biological Diversity (2000): Ecosystem Approach. Decision V/6. Montreal: CBD.

CBD – Convention on Biological Diversity (2002a): Global Strategy for Plant Conservation. Decision VI/9. Montreal CBD.

CBD – Convention on Biological Diversity (2002b): Strategic Plan for the Convention on Biological Diversity. Decision VI/26. Montreal: CBD.

CBD – Convention on Biological Diversity (2002c): Alien Species That Threaten Ecosystems, Habitats or Species. Decision VI/23. Montreal: CBD.

CBD – Convention on Biological Diversity (2004a): Ecosystem Approach. Decision VII/11. Montreal: CBD.

CBD – Convention on Biological Diversity (2004b): Protected areas (Articles 8 (a) to (e)). Decision VII/28. Montreal CBD.

CBD – Convention on Biological Diversity (2004c): Strategic Plan: Future Evaluation of Progress. Decision VII/30. Montreal: CBD.

CBD – Convention on Biological Diversity (2004d): Addis Ababa Principles and Guidelines for the Sustainabe Use of Biodiversity. Decision VII/14. Montreal: CBD.

CBD – Convention on Biological Diversity (2006a): Global Biodiversity Outlook 2. Montreal: CBD-Sekretariat.

CBD – Convention on Biological Diversity (2006b): Framework for Monitoring Implementation of the Achievement of the 2010 Target and Integration of Targets Into the Thematic Programmes of Work. Decision VIII/15. Montreal: CBD.

CBD – Convention on Biological Diversity (2007): Review of Implementation of the Programme of Work on Protected Areas for the Period 2004–2007. UNEP/CBD/WG-PA/2/2. Montreal: CBD.

CBD – Convention on Biological Diversity (2008a): Forest Biodiversity. Decision IX/5. Montreal: CBD.

CBD – Convention on Biological Diversity (2008b): Ecosystem Approach. Decision IX/7. Montreal: CBD.

Chape, S., Harrison, J., Spalding, M. und Lysenko, I. (2005): Measuring the extent and effectiveness of protected areas as an indicator for meeting global biodiversity targets. Philosophical Transactions of the Royal Society 360, 443–455.

Chaytor, B. (2002): Negotiating further liberalization of environmental goods and services. An exploration of the terms of art. Review of European Community and International Environmental Law 11, 287–297.

Chemrec (2007): The BLGMF System. Internet: http://www.chemrec.se. (gelesen am 28. Juli 2007). Stockholm: Chemrech.

Chivian, E. und Bernstein, A. (2008): Sustaining Life: How Human Health Depends on Biodiversity. Oxford, New York: Oxford University Press.

Chomitz, K. M., Thomas, T. S. und Brandao, A. S. P. (2004): Creating Markets for Habitat Conservation when Habitats are Heterogeneous. World Bank Policy Research Working Paper No. 3429. Washington, DC: World Bank.

Choren (2007): CHOREN-Verfahren zur Erzeugung von BtL-Kraftstoff aus Biomasse. Internet: http://www.choren.com (gelesen am 28. Juli 2007). Freiberg: Choren Industries.

Clarkson, R. und Deyes, K. (2002): Estimating the Costs of Carbon Emissions. London: HM Treasury.

Clifton-Brown, J. C., Breuer, J. und Jones, M. B. (2007): Carbon mitigation by the energy crop. Miscanthus. Global Change Biology 13, 2296–2307.

Cochrane, M. A. (2003): Fire science for rainforests. Nature 421, 913–919.

Collatz, G. J., Ribas-Carbo, M. und Berry, J. A. (1992): Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of V4 plants. Australian Journal of Plant Physiology 19 (5), 519–538.

Collier, P. (2007): The Bottom Billion: Why the Poorest Countries Are Failing and What Can Be Done About It. Oxford, New York: Oxford University Press.

Collins, W. D., Bitz, C. M., Blackmon, M. L., Bonan, G. B., Bretherton, C. S., Carton, J. A., Chang, P., Doney, S. C., Hack, J. J., Henderson, T. B., Kiehl, J. T., Large, W. G., McKenna, D. S., Santer, B. D. und Smith, R. D. (2006): The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3). Journal of Climate 19 (11), 2122–2143.

Colwell, R. K., Brehm, G., Cardelús, C. L., Gilman, A. C. und Longino, J. T. (2008): Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. Science 322, 258–260.

COMPETE (2008): Project Website. Internet: http://www.compete-bioafrica.net/ (gelesen am 24. Juli 2008). London, München: COMPETE Platform for Bioenergy in Arid and Semi-Arid Ecosystems in Africa.

Conniff, R. (2007): Bioenergy – The Cure for Our Oil Addiction? . Internet: http://forestry.yale.edu/pubs/Bioenergy-The-Cure-for-Our-Oil-Addiction/ (gelesen am 10. Oktober 2008). New Haven, CT: Yale School of Forestry & Environmental Studies.

Constantin, A. L. (2008): A Time of High Prices: An Opportunity For the Rural Poor? Minneapolis, Minnesota: Institute for Agriculture and Trade Policy.

Cotula, l., Dyer, N. und Vermeulen, S. (2008): Fuelling Exclusion? The Biofuels Boom and Poor People's Access to Land. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Cramer, W., Bondeau, A., Schapphoff, S., Lucht, W., Smith, B. und Sitch, S. (2004): Tropical forest and the global carbon cycle: impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B 359, 331–343.

Crews, T. E. und Peoples, M. B. (2005): Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-base agroecosystems? A review. Nutrient Cycling in Agroecosystems 72, 101–120.

Dasappa, S., Sridhar, G. und Sridhar, H. V. (2003): "Bio-residue gasification – Science and Technology" at Roundtable on Biomass Gasification Technologies, December 2003, Combustion, Gasification & Propulsion Laboratory, Dept. of Aerospace Engineering. Bangalore: Indian Institute of Science.

Datta, S. K. (2002): Recent Developments in Transgenics for Abiotic Stress Tolerance in Rice. JIRCAS Working Report. Ibaraki, Japan: Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS).

DB – Deutsche Bahn Energie (2008): DB Energie – Zusammensetzung des Strom-Mix der DB Energie GmbH. Internet: http://www.dbenergie.de/site/dbenergie/de/start.html (gelesen am 18. September 2008). Frankfurt/M.: DB Energie GmbH.

DBV – Deutscher Bauernverband (2004): Der Biomasse gehört die energetische Zukunft. Pressemitteilung vom 10.02.2004. Berlin, Brüssel: DBV.

de Fraiture, C., Giordano, M. A. und Liao, Y. (2008): Biofuels and implications for agricultural water use: blue impacts of green energy. Water Policy 10 (Supplement 1), 67–81.

de Fraiture, C., Giordano, M. A. und Yonsong, L. (2007): Biofuels and Implications for Agricultural Water Use: Blue Impacts of Green Energy. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.

de Koning, G. H. J., Veldkamp, E. und López-Ulloa, M. (2003): Quantification of carbon sequestration in soils following pasture to forest conversion in northwestern Ecuador. Global Biogeochemical Cycles 17, 1098.

de La Torre Ugarte, D. G. (2006): Developing Bioenergy: Economic and Social Issues. IFPRI Bioenergy and Agriculture: Promises and Challenges, Focus 14, Brief 2. Washington, DC: International Food Policy Research Institute (IFPRI).

de Lacerda, A. E., Kanashiro, M. und Sebbenn, A. M. (2008): Effects of reduced impact logging on genetic diversity and spatial genetic structure of a Hymenaea courbaril population in the Brazilian Amazon forest. Forest Ecology and Management 2555, 1034–1043.

de Santi, G. (2008): Biofuels in the European Context: Facts and Uncertainties. Brüssel: European Commission Joint Research Centre (JRC).

Debiel, T. und Werthes, S. (2006): Fragile Staaten und globale Friedenssicherung. In: Debiel, T., Messner, D. und Nuscheler, F. (Hrsg.): Globale Trends 2007. Frankfurt/M.: Fischer, 81–103.

DEFRA – Department for Environment Food and Rural Affairs (2007): The Waste Strategy for England. London: DEFRA.

DeFries, R. S., Bounoua, L. und Collatz, G. J. (2002): Human modification of the landscape and surface climate in the next fifty years. Global Change Biology 8, 438-458. 8, 438–458.

DeFries, R. S. und Townsend, J. R. G. (1999): Global land cover characterization from satellite data: from research to operational implementation? Global Ecology and Biogeography 8, 367–379.

Delgado, C., Rosegrant, M., Steinfeld, H., Ehui, S. und Courbois, C. (1999): Livestock to 2020 – The Next Food Revolution. Food, Agriculture and the Environment Discussion. Paper 28. Washington, DC: International Food Policy Research Institute (IFPRI).

Delworth, T. L., Broccoli, A. J., Rosati, A., Stouffer, R. J., Balaji, V., Beesley, J. A., Cooke, W. F., Dixon, K. W., Dunne, J., Dunne, K. A., Durachta, J. W., Findell, K. L., Ginoux, P., Gnanadesikan, A., Gordon, C. T., Griffies, S. M., Gudgel, R., Harrison, M. J., Held, I. M., Hemler, R. S., Horowitz, L. W., Klein, S. A., Knutson, T. R., Kushner, P. J., Langenhorst, A. R., Lee, H.-C., Lin, S.-J., Lu, J., Malyshev, S. L., Milly, P. C. D., Ramaswamy, V., Russell, J., Schwarzkopf, M. D., Shevliakova, E., Sirutis, J. J., Spelman, M. J., Stern, W. F., Winton, M., Wittenberg, A. T., Wyman, B., Zeng, F. und Zhang, R. (2006): GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part I: Formulation and Simulation Characteristics. Journal of Climate 19 (5), 643–674.

Denevan, W. M. und Woods, W. I. (2004): Discovery and Awareness of Anthropogenic Amazonian Dark Earths. University of Wisconsin-Madison, Southern Illinois University, Edwardsville.

Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M., Dickinson, R. E., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., da Silva Dias, P. L., Wofsy, S. C. und Zhang, X. H. C. U. P., Cambridge, UK und New York, USA (2007): Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: (IPCC), I. P. o. C. C. (Hrsg.): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 499–589.

Déry, P. und Anderson, B. (2007): Peak Phosphorus. Internet: http://www.energybulletin.net/33164.html (gelesen am 16. Mai 2008). Energy Bulletin online.

DESTATIS – Statistisches Bundesamt (2006): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Internet: http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Navigation/Statistiken/LandForstwirtschaft/LandForstwirtschaft.psml (gelesen am 27. Februar 2008). Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Deutsch, C. a., Tewksbury, J. J., Huey, R. B., Sheldon, K. S., Ghalambor, C. K., Haak, D. C. und Martin, P. R. (2008): Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. PNAS 105 (18), 6668–6672.

Deutscher Bundestag (2008): Unterrichtung durch die Bundesregierung. Bericht der Bundesregierung über das Ministertreffen der Welthandelsorganisation in Genf vom 21. bis 30. Juli 2008 (Doha-Runde) Zugeleitet mit Schreiben des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie vom 23. August 2008. Drucksache 16/10171. 16. Wahlperiode 26.08.2008. Berlin: Deutscher Bundestag.

DGE – Deutsche Gesellschaft für Ernährung (2007): Neue Richtwerte für die Energiezufuhr. Bonn: DGE.

Diaz, R. J. und Rosenberg, R. (2008): Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. Science 321, 926–929.

DIN – Deutsche Industrie Norm (2008a): DIN EN 14511-3 – Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und Kühlung. Teil 3: Prüfverfahren. Deutsche Fassung EN 14511-3:2007. Berlin: Beuth Verlag.

DIN – Deutsche Industrie Norm (2008b): DIN EN 255-3 – Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Heizen – Prüfungen und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwarmwasser. Deutsche Fassung prEN 255-3:2008. Berlin: Beuth Verlag.

Djaja, K. (2006): Development of Biofuel / Green Energy in Indonesia: Plan and Strategy. Präsentation auf dem Workshop on Mainstreaming Policies and Investment in Low Carbon: Opportunities for New Approaches to Investment and Flexible Mechanism. Bangkok, 30-31.08.2006. Bangkok: Coordinating Ministry of Economic Affairs.

DMFA – Dutch Ministry of Foreign Affairs (2008): SNV Biogas Programme Shortlisted for Energy Prize. Internet: http://www.minbuza.nl/en/news/pressreleases,2007/03/SNV-biogas-programme-shortlisted-for-energy-prize.html (gelesen am 27. Februar 2008). The Hague: DMFA.

Donner, S. D. und Kucharik, C. J. (2008): Corn-based ethanol production compromises goal of reducing nitrogen export by the Mississippi River. Proceedings of the National Academy of Sciences of America 105 (11), 4513–4518.

Doornbosch, R. und Steenblik, R. (2007): Biofuels: is the cure worse than the disease? Background paper for the OECD Round Table on Sustainable Development, Paris, 11–12 September 2007. OECD-Dokument SG/SD/RT(2007)3. Paris: OECD.

Doyle, U., Vohland, K., Rock, J., Schümann, K. und Ristow, M. (2007): Nachwachsende Rohstoffe – eine Einschätzung

aus Sicht des Naturschutzes. Natur und Landschaft 82 (12), 529–353.

Dreier, T. und Tzscheutschler, P. (2000): Ganzheitliche Systemanalyse für die Erzeugung und Anwendung von Biodiesel und Naturdiesel im Verkehrssektor. Technische Universität München, Energiewirtschaft und Anwendungstechnik. München: Technische Universität München (TUM).

Droege, S. (2001): Ecological labelling and the World Trade Organization. Außenwirtschaft 56, 99–122.

Dudley, N., Belokurov, A., Borodin, O., Higgins-Zogib, L., Hockings, M. (2004): How Effective Are Protected Areas? A Preliminary Analysis of Forest Protected Areas by WWF – The Largest Ever Global Assessment of Protected Area Management Effectiveness. Gland: WWF International.

Dudley, N. und Stolton, S. (1999a): Conversion of Paper Parks to Effective Management: Developing a Target. Report to the WWF-World Bank Alliance from the IUCN/WWF Forest Innovation Project. Gland: The World Conservation Union (IUCN).

Dudley, N. und Stolton, S. (1999b): Threats to Forest Protected Areas. Summary of a Survey of 10 Countries Carried out in Association with the World Commission on Protected Areas. Genf: IPCC.

Dudley, N. (2008): Guidelines for Applying Protected Area Management Categories. Gland: The World Conservation Union (IUCN).

Dufey, A. (2006): Biofuels Production, Trade and Sustainable Development, Emerging Issues. Sustainable Markets Discussion Paper 2. London: International Institute for Environment and Development (IIED).

Dupraz, C., Burgess, P., Gavaland, A., Graves, A., Herzog, F., Incoll, L. D., Jackson, N., Keesman, K., Lawson, G., Lecomte, I., Liagre, F., Mantzanas, K., Mayus, M., Moreno, G., Palma, J., Papanastasis, V., Paris, P., Pilbeam, D. J., Reisner, Y., van Noordwijk, M., Vincent, G. und van der Werf, W. (2005): SAFE Final Report. Synthesis of the SAFE Project (August 2001–January 2005). Brüssel: Silvoarable Agroforestry for Europe (SAFE).

Durstewitz, M., Hahn, B., Lange, B., Rohrig, K. und Wessel, A. (2008): Windenergie Report Deutschland 2007. Kassel: Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.

Dutschke, M., Kapp, G., Lehmann, A. und Schäfer, V. (2006): Risks and Chances of Combined Forestry and Biomass Projects under the Clean Development Mechanism. CD4CDM Working Paper Series. Working Paper No. 1. Roskilde: UNEP Risoe Centre on Energy, Climate and Sustainable Development.

EAA – Electric Auto Association (2007): Frequently Asked Questions About Electrical Vehicles. Internet: http://www.pluginamerica.com/faq.shtml (gelesen am 15. November 2007). El Segundo, CA: EEA.

Easterling, W. E., Aggarwal, P. K., Batima, P., Brander, K. M., Erda, L., Howden, S. M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J.-F., Schmidhuber, J. und Tubiello, F. N. (2007): Food, fibre and forest products. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 273–313.

Economist (2008a): A Special Report on the Future of Energy. London: Economist.

Economist (2008b): Biofuels in India. Power plants. Economist (20.09.), 68.

EcoTrade (2008): Comment on the Green Paper on Market-Based Instruments for Environmental and Related Policy Purposes by the European Research Team of the EcoTrade Project. Leipzig: Ecotrade Project Umweltforschungszentrum Leipzig (UFZ).

Edelbrock, K. (2005): Initiative 2000plus. Präsentation Recyclingpapier. Berlin: Unveröffentlichtes Manuskript.

EEA – European Environment Agency (2006): Urban Sprawl in Europe: The Ignored Challenge. EEA Report No 10. Kopenhagen: EEA.

EEA – European Environment Agency (2007a): Environmentally Compatible Bio-Energy Potential From European Forests. Kopenhagen: EEA.

EEA – European Environment Agency (2007b): Estimating the Environmentally Compatible Bioenergy Potential From Agriculture. EEA Technical Report 12/2007. Kopenhagen: EEA.

EERE – US Department of Energy-Energy Efficiency and Renewable Energy (2008): Federal Biomass Policy. Internet: http://www1.eere.energy.gov/biomass/federal_biomass.html (gelesen am 11. Juni 2008). Washington, DC: EERE.

Egenhofer, C. (2007): Looking for the cure-all? Targets and the EU#S New Energy Strategy. CEPS Policy Brief 118, 1–5.

EIA – Energy Information Administration (2008): Official Energy Statistics From the US Government – Indonesia – Country Analysis Briefs. Internet: http://www.eia.doe.gov/emeu/cabs/Indonesia/Background.html (gelesen am 7. März 2008). Washington, DC: EIA.

Eide, A. (2008): The Right to Food and the Impact of Liquid Biofuels (Agrofuels). Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

EIU – Economist Intelligence Unit (2006): Cuba Economy: High Growth Set to Continue. Country Briefing. Internet: http://www.viewswire.com/index.asp?layout=VWArticleVW3&article_id=231375608&rf=0 (gelesen am 17. September 2008). London: EIU.

El Bassam, N. (1998): Energy Plant Species – Their Use and Impact on Environment and Development. London: James & James.

Ellis, E. C. und Ramankutty, N. (2008): Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. Front Ecol Environ 6, doi:10.1890/070062.

Endres, A. (1995): Zur Ökonomie internationaler Umweltvereinbarungen. Zeitschrift für Umweltpolitik 18 (2), 143–178.

Engel, T. (2007): Plug-in Hybrids. Studie zur Abschätzung des Potentials zur Reduktion der CO_2-Emissionen im PKW-Verkehr bei verstärkter Nutzung von elektrischen Antrieben im Zusammenhang mit Plug-in Hybrid Fahrzeugen. München: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie.

Enkvist, P.-A., Nucler, T. und Rosander, J. (2007): A cost curve for greenhouse gas reduction. The McKinsey Quarterly 1, 35–45.

EPIA – European Photovoltaic Industry Association (2008): Cummulative Installed PV Capacities. Internet: http://www.epia.org/index.php?id=86 (gelesen am 27. Februar 2008). Brüssel: EPIA.

Epiney, A. (2000): Welthandel und Umwelt. Deutsches Verwaltungsblatt 115, 77–86.

Epiney, A. und Scheyli, M. (2000): Umweltvölkerrecht. Völkerrechtliche Bezugspunkte des schweizerischen Umweltrechts. Bern: Stämpfli.

Erbrecht, T. und Lucht, W. (2006): Impacts of large-scale climatic disturbances on the terrestrial carbon cycle. Carbon Balance and Management 1, 7.

EU – Europäische Union (2003): EU-Verordnung 1782/2003/EG: Verordnung (EG) Nr. 1782/2003 des Rates vom 29. September 2003 mit gemeinsamen Regeln für Direktzah-

lungen im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik. Amtsblatt der Europäischen Union v. 21.10.2003, L 270/1-L 270/69. Brüssel: EU.

EU Coherence (2008): Diverse Artikel zum Thema Biokraftstoffe und Entwicklungszusammenarbeit. Internet: http://www.eucoherence.org (gelesen am 07. Oktober 2008). Brüssel: EU Coherence.

EU-Kommission (2004): Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on the Future of the EU Energy Initiative and the Modalities for the Establishment of an Energy Facility for the ACP Countries. COM(2004) 711 final. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2005a): Aktionsplan für Biomasse. Mitteilung der Kommission. KOM (2005) 628 endgültig. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2005b): Förderung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen. Mitteilung der Kommission. KOM (2005) 627 endgültig. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2005c): EU-Russia Energy Dialogue. Sixth Progress Report. Moscow/Brussels. Internet: http://europa.eu.int/comm/energy/russia/joint_progress/doc/progress6_en.pdf (gelesen am 08. Oktober 2008). Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2005d): Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament. Bericht über die Durchführung der EU-Forststrategie {SEC(2005)333}. Brüssel: EU Kommission.

EU-Kommission (2005e): The European Consensus on Development. Joint Statement by the Council and the Representatives of the Governments of the Member States Meeting Within the Council, the European Parliament and the Commission. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2005f): EU Strategy for Africa: Towards a Euro-African Pact to Accelerate Africa's Development. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2006a): Fortschrittsbericht Biokraftstoffe. Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament. KOM (2006) 845 endgültig

EU-Kommission (2008): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. KOM (2008) 19 endgültig. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2006b): Strategie für Biokraftstoffe. KOM (2006) 34 endgültig. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2007a): Grünbuch. Marktwirtschaftliche Instrumente für umwelt- und energiepolitische Ziele. KOM(2007) 140 endgültig. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2007b): Commission Staff Working Document Accompanying the Green Paper on Market-Based Instruments for Environment and Energy Related Policy Purposes. SEC(2007) 388. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2008a): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. KOM (2008) 19 endgültig. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2008b): Trade in Agricultural Goods and Fishery Products. Agricultural Policy and Trade: Trade Partners. LDCs. Internet: http://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2006/june/tradoc_120307.pdf (gelesen am 29. April 2008). Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2008c): African Union Commission and European Commission Launch an Ambitious Africa-EU Energy Partnership. Press Release. Internet: http://www.europafrica.org (gelesen am 20. Oktober 2008). Brüssel: EU-Kommission.

EU-Parlament (2008): More Sustainable Energy in Road Transport Targets. Pressemitteilung vom 10.9.2008. Internet: http://www.europarl.europa.eu/news/expert/infopress_page/064-36659-254-09-37-911-20080909IPR36658-10-09-2008-2008-false/default_en.htm (gelesen am 15. Oktober 2008). Brüssel: EU-Parlament.

EUIE – European Union Energy Initiative und GTZ – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (2006): The Significance of Biomass Energy Strategies (BEST) for Sub-Saharan Africa. Background Paper for 1st Regional Workshop on Biomass Energy Strategy (BEST) Development Held in Dar-es-Salaam, Tanzania, 12–14 September 2006. Eschborn: EUIE, GTZ.

Euractiv (2008): Europaabgeordnete und Kommision straiten sich über Biokraftstoffziel. Meldung vom 8. Juli 2008. Internet: http://www.euractiv.com/de/verkehr/europaabgeordnete-kommission-streiten-biokraftstoffziel/article-174044 (gelesen am 19. August 2008). Brüssel: Euractiv.

Europe Aid (2007): Newsletter Europe Aid. ACP-EC Energy Facility. Seventeenth Issue. Brüssel: Europe Aid Energy Facility.

Europe Economics (2008): A Comparison of the Costs of Alternative Policies for Reducing UK Carbon Emissions. Europe Economics Report for Open Europe. London: Europe Economics.

Faaij, A. (2008): Bioenergy and Global Food Security. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Welt im Wandel: Bioenergie und nachhaltige Landnutzung". Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex03.pdf. Berlin: WBGU.

Fairless, D. (2007): The little shrub that could – maybe. Nature 449, 652–653.

Fang, Q., Yu, Q., Wang, E., Chen, Y., Zhang, G., Wang, J. und Li, L. (2006): Soil nitrate accumulation, leaching and crop nitrogen use as influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat–maize double cropping system in the North China Plain. Plant Soil 284, 335–350.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (1990): Soil Map of the World. Revised Legend. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (1992): Biogas Processes for Sustainable Development. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (1996): The State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture. Background Documentation Prepared for ITCPGR. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (1997): Africover Land Cover Classification. Report. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2001a): The State of Food Insecurity in the World 2001. Food Insecurity: When People Live With Hunger and Fear Starvation. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2001b): Global Estimates of Gaseous Emissions of NH3, NO and N2O from Agricultural Land. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (Hrsg.) (2003a): World Agriculture: Towards 2015/2030. London: Earthscan.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2003b): Compendium of Agricultural - Environmental Indicators 1989–91 to 2000. Rom: FAO Statistics Analysis Service, Statistics Division.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2004): Human Energy Requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. Rome, 17–24 October 2001. Internet: http://www.fao.org/docrep/007/

y5686e/y5686e00.htm (gelesen am 23. Juli 2007). Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2005): World Forest Assessment. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006a): The State of Food Insecurity in the World 2006. Eradicating World Hunger – Taking Stock Ten Years After the World Food Summit. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006b): World Agriculture: Towards 2030/2050. Interim Report. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006c): Global Forest Resources Assessment 2005. Progress Towards Sustainable Forest Management. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2007a): State of the World's Forests 2007. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2007b): The State of Food and Agriculture. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2007c): A Review of the Current State of Bioenergy in G8+5 Countries. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2008a): Soaring Food Prices: Facts, Perspectives, Impacts and Actions Required, Conference Document, High-Level Conference on World Food Security: The Challenges of Climate Change and Bioenergy, Rome 3–5 June 2008. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2008b): Crop Prospects and Food Situation. Internet: http//www.fao.org/docrep/010/ai465e/ai465e01.htm (gelesen am 02. Juli 2008). Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2008c): The State of Food and Agriculture 2008. Biofuels: Prospects, Risks and Opportunities. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2008d): Climate Change, Water and Food Security. Rom: FAO.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2008e): FAO Unveils New Bioenergy Assessment Tool. FAO Newsroom. Internet: http://www.fao.org/newsroom/en/news/2008/1000782/index.html (gelesen am 02. Juni 2008). Rom: FAO.

FAO-RWEDP – Food and Agriculture Organization of the United Nations – Regional Wood Energy Development Programme in Asia (2008): Biomass Energy Technology – Wood Energy Data. Internet: http://www.rwedp.org/d_technodc.html (gelesen am 13. Oktober 2008). Rom, Bangkok: FAO-RWEDP.

FAOSTAT – Statistical Division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006): FAOSTAT Agricultural Data. Internet: http://faostat.fao.org/ (gelesen am 27. Februar 2008). Rom: FAOSTAT.

FAOSTAT – Statistical Division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (2007): FAOSTAT Data on Production – ProdStat – Crops Internet: http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor (gelesen am 09. Oktober 2008). Rom: FAOSTAT.

FAOSTAT – Statistical Division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (2008a): Data Archives. Internet: http://faostat.fao.org (gelesen am 16. Mai 2008). Rom: FAOSTAT.

FAOSTAT – Statistical Division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (2008b): Statistical Databases. Internet: http://faostat.org/ (gelesen am 27. März 2008). Rom: FAOSTAT.

Farack, M. (2007): Ethanolgetreide – eine neue Qualitätsschiene für die Landwirtschaft. 9. Jahrestagung Thüringer Landwirtschaft. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL).

Fargione, J., Hill, J. K., Tilman, D., Polasky, S. und Hawthorne, P. (2008): Land clearing and the biofuel carbon debt. Science 319, 1235–1238.

Farnum, P., Lucier, A. und Meilan, R. (2007): Ecological and population genetics research imperatives for transgenic trees. Tree Genetics & Genomes 3, 119–133.

Farquhar, G. D., Caemmerer, S. V. und Berry, J. A. (1980): A biochemical-model of photsynthetic CO_2 assimilation in leaves of C-3 species. Planta 149 (1), 78–90.

Farwig, N., Brown, C. und Böhning-Gaese, K. (2007): Human disturbance reduces genetic diversity of an endangered tropical tree, Prunus africana (Rosaceae). Conservation Genetics, doi: 10.1007/s10592–10007–19343–x.

Fatheuer, T. (2007): Mit Agrotreibstoffen aus Brasilien gegen den Klimawandel? Kommentar von Thomas Fatheuer für die Heinrich-Böll-Stiftung. Internet: http://www.boell.de/oekologie/klima/klima-energie-1557.html (gelesen am 20. Oktober 2008). Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung.

Faurès, J.-M., Hoogeveen, J. und Bruinsma, J. (2000): The FAO Irrigated Area Forecast for 2030. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Faust, J. und Croissant, A. (2007): Staatlichkeit und Governance: Herausforderungen in Lateinamerika, Analysen und Stellungnahmen 1/2007. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE).

Fearnside, P. M. (2008): Amazon forest maintenance as a source of environmental services. Annals of the Brazilian Academy of Sciences 80, 101–114.

Feddema, J. J., Oleson, K. W., Bonan, G. B., Mearns, L. O., Buja, L. E., Meehl, G. A. und Washington, W. M. (2005): The importance of land cover change in simulating future climates. Science 310, 1674–1678.

Fedoroff, N. V. und Cohen, J. E. (1999): Plants and population: is there time? Proceedings of the National Academy of Sciences USA 96, 5903–5907.

Fehrenbach, H. (2007): Kriterien zur nachhaltigen Bioenergienutzung im globalen Massstab. Zwischenstand aus einem Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamts. Vortragsfolien zu einem Vortrag im Rahmen der Tagung „Biomasseproduktion – ein Segen für die Land(wirt)schaft? BfN – INA, Insel Vilm, 12.–15. März 2007. Vilm: Bundesamt für Naturschutz Insel Vilm.

Fehrenbach, H., Giegrich, J., Reinhardt, G., Schmitz, J., Sayer, U., Gretz, M., Seizinger, E. und Lanje, K. (2008): Criteria for a Sustainable Use of Bioenergy on a Global Scale. UBA Texte 30/08. Dessau: Umweltbundesamt (UBA).

Felton, A., Wood, J., Felton, A. M., Hennessey, B. und Lindenmayer, D. B. (2008): Bird community responses to reduced-impact logging in a certified forestry concession in lowland Bolivia. Biological Conservation 141, 545–555.

FES – Friedrich-Ebert-Stiftung (2007): The Creation of an International Renewable Energy Agency (IRENA). Veranstaltungsbericht, 21. Juni 2007. Washington, DC: FES Washington.

FiBL – Forschungsinstitut für Biologischen Landbau (2001): Bio fördert Bodenfruchtbarkeit und Artenvielfalt. Erkenntnisse aus 21 Jahren DOK-Versuch (Dossier 1). Frick, Schweiz: FiBL.

Fichtner (2003): Gutachten zur Berücksichtigung großer Laufwasserkraftwerke im EEG. Endbericht. Berlin, Stuttgart: BMU, Fichtner.

Field, C. B., Campbell, J. E. und Lobell, D. B. (2008): Biomass energy: the scale of the potential resource. Trends in Ecology & Evolution 23 (2), 65–72.

Finon, D. (2007): Pros and cons of alternative polices aimed at promoting renewables. EIB papers 12 (2), 110–133.

Fischer, G., van Velthuizen, H., Shah, M. und Nachtergaele, F. O. (2002): Global Agro-Ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results. Research Report RR-02-02. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).

Fischlin, A., Midgley, G. F., Price, J. T., Leemans, R., Gopal, B., Turley, C., Rounsevell, M. D. A., Dube, O. P., Tarazona, J. und Velichko, A. A. (2007): Ecosystems, their properties, goods, and services. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 211–272.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2005): Leitfaden Bioenergie: Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Gülzow: FNR.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2006a): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow: FNR.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2006b): Biokraftstoffe – eine vergleichende Analyse. Gülzow: FNR.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2006c): Nachwachsende Rohstoffe in der Industrie. Gülzow: FNR.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2006d): Leitfaden – Bioenergie im Gartenbau. Gülzow: FNR.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2006e): Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz. Gülzow: FNR.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2007a): Bioenergie: Pflanzen, Rohstoffe, Produkte. Gülzow: FNR.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2007b): Handbuch – Bioenergie-Kleinanlagen. Gülzow: FNR.

FOES – Förderverein Ökologische Steuerreform (2008): Schädliche Subventionen gegen die biologische Vielfalt. Eine Studie im Auftrag des DNR. München: FOES.

Foley, J. A. (1995): An Equilibrium-Model of the Terrestrial Carbon Budget. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology 47 (3), 310–319.

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N. und Snyder, P. K. (2005): Global consequences of land use. Science 309 (5734), 570–574.

Foreign Policy (2008): The Failed State Index 2008. Foreign Policy July/August 2008. Internet: http://www.foreignpolicy.com/story/cms.php?story_id=4350 (gelesen am 4. August 2008). Washington, DC: Foreign Policy.

Fowles, M. (2007): Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy. Biomass & Bioenergy 31, 426–432.

Freibauer, A., Rounsevell, M. D. A., Smith, P. und Verhagen, J. (2004): Carbon sequestration in the acricultural soils of Europe. Geoderma 122, 1–23.

Fritsche, U. R., Dehoust, G., Jenseit, W., Hünecke, K., Rausch, L., Schüler, D., Wiegmann, K., Heinz, A., Hiebel, M., Ising, M., Kabasci, S., Unger, C., Thrän, D., Fröhlich, N., Scholwin, F., Reinhardt, G., Gärtner, S., Patyk, A., Bauer, F., Bemmann, U., Groß, B., Heib, M., Ziegler, C., Flake, M., Schmehl, M. und Simon, S. (2004): Stromstoffanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Verbundprojekt gefördert vom BMU im Rahmen des ZIP. Darmstadt, Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Fritsche, U., Hünecke, K., Hermann, A., Schulze, F. und Wiegmann, K. (2006): Sustainability Standards for Bioenergy. Frankfurt/M.: WWF Deutschland.

Fritsche, U. (2007): GHG Accounting for Biofuels: Considering CO_2 from Leakage. Working Paper Prepared for BMU by Ökoinstitut. Extended and Updated Version. Darmstadt: Öko-Institut.

Fritsche, U. R. und Hennenberg, K. (2008): Stand der internationalen Prozesse zum Thema „nachhaltige Biomasse“. Arbeitspapier. Update 2. Darmstadt: Öko-Institut.

Fritsche, U. R. und Wiegmann, K. (2008): Ökobilanzierung der Umweltauswirkungen von Bioenergie-Konversionspfaden. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Welt im Wandel: Bioenergie und nachhaltige Landnutzung“. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex04.pdf. Berlin: WBGU.

Fritsche, U. R., Hennenberg, K. J. und Wiegmann, K. (2008): Bioenergy and Biodiversity: Potential for Sustainable Use of Degraded Lands. Briefing Paper for the Information Event at CBD-COP9 on May 27, 2008. Darmstadt: Öko-Institut, Darmstadt Office.

Fritz, T. (2007): Zertifiziertes Raubrittertum. Wie Nichtregierungsorganisationen dem Welthandel auf die Sprünge helfen. Lateinamerika Nachrichten (396), 31–35.

Fritz, T. (2008): Agroenergie in Lateinamerika. Fallstudie anhand vier ausgewählter Länder: Brasilien, Argentinien, Paraguay und Kolumbien. Bonn: Brot für die Welt.

Fürnsinn, S. (2007): Polygeneration – Strategie für eine dezentrale Energieerzeugung aus Biomasse. Internationale Tagung Thermo-chemische Biomasse-Vergasung für eine effiziente Strom-/Kraftstoffbereitstellung. Erkenntnisstand 2007. Leipzig, Wien: IE Leipzig, TU Wien.

FWA – Fischer Weltalmanach (2007): Der Fischer Weltalmanach 2008: Zahlen, Daten, Fakten. Frankfurt/M.: Fischer.

FZK – Forschungszentrum Karlsruhe (2007): Institut für Technische Chemie. Internet: http://www.fzk.de/fzk/idcplg?IdcService=FZK&node=1429 (gelesen am 28. Juli 2007). Karlsruhe: FZK.

GBEP – Global Bioenergy Partnership (2007): Homepage of the GBEP. Internet: http://www.globalbioenergy.org/ (gelesen am 09. November 2007). Rom: GBEP.

GBEP – Global Bioenergy Partnership (2008): A Review of the Current State of Bioenergy Development in G8+5 Countries. Rom: GBEP, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

GCP – Global Carbon Project (2008): Carbon Budget and Trends 2007. Internet: http://www.globalcarbonproject.org/ (gelesen am 30. September 2008). Canberra, ACT: GCP.

GEF – Global Environment Facility (2006): GEF Resource Allocation Framework: Indicative Resource Allocations for GEF-4, for Biodiversity and Climate Change Focal Areas. Washington, DC: GEF.

GEF – Global Environment Facility (2007a): Focal Area Strategies and Strategic Programming for GEF-4. GEF/C.31/10. May 11, 2007. Internet: Washington, DC: GEF.

GEF – Global Environment Facility (2007b): Liquid Biofules in Transport: Conclusions and Recommendations of the Scientific and Technical Advisory Panel (STAP) to the Global Environment Facility (GEF). GEF/C.31/Inf.7. New York: GEF Scientific and Technical Advisory Panel.

GEF – Global Environment Facility (2007c): Investing in our Planet. Internet: http://www.gefweb.org Washington, DC: GEF.

GEF – Global Environment Facility und UNDP – United Nations Development Programme (2006): Environmentally Sustainable Transport and Climate Change. Experiences and Lessons From Community Initiatives. The GEF Small Grants Programme (SGF). Washington, DC, New York: GEF, UNDP.

Geist, H. J. und Lambin, E. F. (2002): Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. BioScience 52, 143–150.

Gerbens-Leenes, P. W., Nonhebel, S. und Ivens, W. P. M. F. (2002): A method to determine land requirements relating to food consumption patterns. Agriculture, Ecosystems and Environment 90 (1), 47–58.

Gerten, D., Schaphoff, S., Haberlandt, U., Lucht, W. und Sitch, S. (2004): Terrestrial vegetation and water balance - hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. Journal of Hydrology 286 (1–4), 249–270.

Girardet, H. (1996): The Gaia Atlas of Cities: New Directions for Sustainable Urban Living. London: Gaia Books Ltd.

Glastra, R., Wakker, E. und Richert, W. (2002): Kahlschlag zum Frühstück. Palmöl–Produkte und die Zerstörung indonesischer Wälder: Zusammenhänge, Ursachen und Konsequenzen. Frankfurt/M.: WWF Deutschland.

Glowka, L., Burhenne–Guilmin, F., Synge, H., (1994): A Guide to the Convention on Biological Diversity. Gland und Cambridge: The World Conservation Union (IUCN).

Gnansounou, E., Panichelli, L., Dauriat, A. und Villegas, J. D. (2008): Accounting for Indirect Land-Use Changes in GHG Balances of Biofules. Working Paper. Lausanne, Schweiz: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.

Goeden, R. D. und Andres, L. A. (1999): Biological control of weeds in terrestrial and aquatic environments. Chapter 34. In: Bellows, T. S. und Fisher, T. W. (Hrsg.): Handbook of Biological Control: Principles and Applications of Biological Control. London: Academic Press, 871–890.

Govindasamy, B., Duffy, P. B. und Caldeira, K. (2001): Land use changes and and northern hemisphere cooling. Geophysical Research Letters 28, 291–294.

Grain (2008): Agrofuels in India. Barcelona: Grain.

Grävingholt, J. (2007): Staatlichkeit und Governance: Herausforderungen in Zentralasien und im Südkaukasus. Analysen und Stellungnahmen 2/2007. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE).

Green, R. E., Cornell, S. J., Scharlemann, J. P. W. und Balmford, A. (2005): Farming and the fate of wild nature. Science 307, 550–555.

Greenpeace (2007): Globale Energie-[r]evolution; Ein Weg zu einer nachhaltigen Enerige-Zukunft für die Welt. Amsterdam, Brüssel: Greenpeace International.

Greenpeace (2008): Soja-Diesel im Tank. Greenpeace Factsheet 4/2008. Internet: http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/waelder/FSSojaDieselFINAL.pdf (gelesen am 23. Juni 2008). Berlin: Greenpeace.

Greenpeace und EREC – European Renewable Energy Council (2007): Globale Energie-(R)Evolution – Ein Weg zu einer nachhaltigen Energie-Zukunft für die Welt. Berlin: Greenpeace, EREC.

Grieg-Gran, M. (2006): The Cost of Avoiding Deforestation. Report prepared for the Stern Review of the Economics of Climate Change. London: International Institute for Environment and Development (IIED).

Grimm, S. und Klingebiel, S. (2007): Staatlichkeit und Governance: Herausforderungen in Subsahara-Afrika. Analysen und Stellungnahmen 3/2007. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE).

Grogan, P. und Matthews, R. (2002): A modelling analysis of the potential for soil carbon sequestration under short rotation coppice willow energy plantations. Soil Use and Management 18, 175–183.

Grönkvist, S., Möllersten, K. und Pingoud, K. (2006): Equal opportunity for biomass in greenhouse gas accouniting of CO_2 capture and storage: A step towards more cost-effective climate change mitigation regimes. Mitigation and Adaptation Srategies for Global Change 11, 1083–1096.

Grote, U. (2002): Eco-Labelling in the Agricultural Sector: An International Perspective. Paper anlässlich der High-level Pan-European Conference on Agriculture and Biodiversity: Towards Integrating Biological and Landscape Diversity for Sustainable Agriculture in Europe. Paris, Maison de l'Unesco, 5.–7. Juni 2002. Paris: UNESCO.

Grunert, M. (2007): Pflanzenöl als Kraftstoff. Möglichkeiten und Grenzen aus acker- und pflanzenbaulicher Sicht. Tagungsband der 6. Fachtagung Kraftstoff Pflanzenöl am 9.11. 2007 in Nossen. Nossen: Tagungs-Sekretariat.

Grünzweig, J. M., Gelfand, I., Fried, Y. und Yakir, D. (2007): Biogeochemical factors contibuting to enhanced carbon storage following afforestation of a semi-arid shrubland. Biogeosciences 4, 891–904.

GTZ – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (2006): Liquid Biofuels for Transportation – Chinese Protential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century. Internet: http://www.gtz.de/de/dokumente/en-biofuels-for-transportation-in-china-2005.pdf (gelesen am 27. Februar 2008). Eschborn, Peking: GTZ.

GTZ – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (2007a): Energiepolitische Rahmenbedingungen für Strommärkte und erneuerbare Energien. 23 Länderanalysen. Eschborn: GTZ Sektorvorhaben TERNA Windenergie.

GTZ – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (2007b): The Voluntary Emission Reduction Market: Characteristics, Risks and Opportunities. Factsheet Commissioned by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development. Eschborn: GTZ.

GTZ – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (2007c): Cooking Energy – Why it Really Matters if we Are to Halve Poverty by 2015. Eschborn: GTZ.

GTZ-EAP – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit Energy Advisory Project (2007): Energy Advisory Project Annual General Report 2007. Kampala: GTZ/EAP.

Guo, L. B. und Gifford, R. M. (2002): Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global Change Biology 8, 345–360.

Gupta, S., Tirpak, D. A., Burger, N., Gupta, J., Höhne, N., Boncheva, A. I., Kanoan, G. M., Kolstad, C., Kruger, J. A., Michaelowa, A., Murase, S., Pershing, J., Saijo, T. und Sari, A. (2007): Policies, instruments and co-operative arrangements. In: Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R. und Meyer, L. A. (Hrsg.): Climate Change 2007. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 745–808.

Gutman, P. und Davidson, S. (2007): A Review of Innovative International Financial Mechanisms for Biodiversity Conservation. With Special Focus on the International Financing of Developing Countries' Protected Areas. New York: WWF-MPO Macroeconomics Programme Office.

GWEC – Global Wind Energy Council (2008): Global Wind 2008 Report. Brüssel: GWEC.

Haberl, H., Erb, K. H., Krausmann, F., Gaube, V., Bondeau, A., Plutzar, C., Gingrich, S., Lucht, W. und Fischer-Kowalski, M. (2007): Quantifiying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. PNAS 104 (31), 12942–12947.

Hails, C. (2006): Living Planet Report 2006. Genf, London: World Wildlife Fund, Global Footprint Network, Zoological Society London.

Haines, D. und Skinner, I. (2005): The Marketing of Mobility Services. London: Institute for European Environmental Policy (IEEP).

Hakkila, P. und Parikka, M. (2002): Fuel resources from the forest. In: Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A. T. und Smith, C. T. (Hrsg.): Bioenergy From Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice. Dordrecht: Kluwer, 19–48.

Halpin, P. N. (1997): Global climate change and natural-area protection: management responses and research directions. Ecological Applications 7, 828–843.

Hannah, L., Midgley, G. F., Andelman, S. J., Araújo, M. B., Hughes, G., Martinez-Meyer, E., Pearson, R. und Williams, P. (2007): Protected area needs in a changing climate. Front Ecol Environ 5 (3), 131–138.

Hansen, E. A. (1993): Soil carbon sequestration beneath hybrid poplar plantations in the north central United States. Biomass and Bioenergy 5, 431–436.

Hanstad, T., Haque, T. und Nielsen, R. (2008): Improving land access for India's rural poor. Economic & Political Weekly (März), NN.

Harcombe, P. A., Harmon, M. E. und Greene, S. E. (1990): Changes in biomass and production over 53 years in a coastal Picea-sitchensis – Tsuga-heterophylla forest. Canadian Journal of Forest Research 20, 1602–1610.

Harmon, M.-E., Ferrell, W. K. und Franklin, J. F. (1990): Effects on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests. Science 247, 699–702.

Hawn, A. (2008): Malua Wildlife Habitat Conservation Bank Launches in Sabah, Malysia. New Business Model Generates Innovative Product to Support Wildlife Conservation. Sabah, Malaysia Malua BioBank.

Heaton, E. A., Clifton-Brown, J., Voigt, T. B., Jones, M. B. und Long, S. P. (2004): Micanthus for renewable energy generation: European Union experience and projections for Illinois. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 9, 433–451.

Hedde, M., Aubert, M., Decaens, T. und Bureau, F. (2008): Dynamics of soil carbon in a beechwood chronosequence forest. Forest Ecology and Management 255, 193–202.

Heistermann, M., Müller, C. und Ronneberger, K. (2006): Land in sight? Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling. Agriculture Ecosystems & Environment 114 (2–4), 141–158.

Hepeng, J. (2008): Chinese biofuel 'could endanger biodiversity'. Internet: http://www.scidev.net/en/news/chinese-biofuel-could-endanger-biodiversity-.html (gelesen am 19. Mai 2008). SciDev Net online.

Hickler, T., Smith, B., Sykes, M. T., Davis, M. B., Sugita, S. und Walker, K. (2004): Using a generalized vegetation model to simulate vegetation dynamics in northeastern USA. Ecology 85 (2), 519–530.

Hilf, M. und Oeter, S. (2005): WTO-Recht. Rechtsordnung des Welthandels. Baden-Baden: Nomos.

Hodson, P. (2008): Biofuels Sustainability in the EU Renewable Energy Directive – WIREC Side Meeting, 4. März 2008. Internet: http://www.oeko.de/service/bio/dateien/en/eu_hodson_wirec2008.pdf (gelesen am 15. August 2008). Brüssel: Europäische Kommission. Generaldirektion Energie und Verkehr.

Höhne, N., Wartmann, S., Herold, A. und Freibauer, A. (2007): The rules for land use, land use change and forestry under the Kyoto Protocol – lessons learned for the future climate negotiations. Environmental Science & Policy 10 (4), 269–394.

Holmberg, N. und Bülow, L. (1998): Improving stress tolerance by gene transfer. Trends in plant science 3 (2), 61–66.

Hoogwijk, M., Faaij, A., Eickhout, B., de Vries, B. und Turkenburg, W. (2005): Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. Biomass & Bioenergy 29, 225–257.

Hoogwijk, M., Faaij, A., van den Broek, R., Berndes, G., Gielen, D. und Turkenburg, W. (2003): Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. Biomass & Bioenergy 25 (2), 119–133.

Hooijer, A., Silvius, M., Wösten, H. und Page, S. (2006): PEAT-CO_2. Assessment of CO_2 Emissions From Drained Peatlands in SE Asia. Delft Hydraulics Report Q3943. Delft: WL Delft Hydraulics.

Houghton, R. A. (2003): Emissions (and Sinks) of Carbon from Land-Use Change (Estimates of National Sources and Sinks of Carbon Resulting From Changes in Land Use, 1950 to 2000. Falmouth, MA: Woods Hole Research Center.

House, J. I., Prentice, C. I. und Le Quére, C. (2002): Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO_2. Global Change Biology 8, 1047–1052.

Huang, J., Pray, C. und Rozelle, S. (2002): Enhancing the crops to feed the poor. Nature 418, 678–684.

Huberman, D. (2007): Scaling up financing for forest protected areas: developing international payments for ecosystem services. In: Schmitt, C. B., Pistorius, T. und Winkel, G. (Hrsg.): A Global Network of Forest Protected Areas under the CBD: Opportunities and Challenges. Proceedings of an International Expert Workshop held in Freiburg, Germany, May 9–11, 2007. Remagen: Kessel, 75–81.

IAASTD – International Assessment of Agricultural Knowledge Science and Technology for Development (2008): IAASTD Homepage. Internet: http://www.agassessment.org/ (gelesen am 16. Mai 2008). Rom: IAASTD.

IADB – Inter-American Development Bank (2008): Press Release: Inter-American Development Bank Announces Partnership to Develop Sustainable Biofuels. Internet: http://www.iadb.org/news/articledetail.cfm?language=EN&artid=4507 (gelesen am 07. Mai 2008). Washington, DC: IDB.

IBRD – International Bank for Reconstruction and Development (2007): Catalyzing Private Investment for a Low-Carbon-Economy – World Bank Group Progress on Renewable Energy and Energy Efficiency in Fiscal 2007. Washington, DC: World Bank.

IE – Institut für Energetik und Umwelt (2007a): Möglichkeiten einer europäischen Biogaseinspeisungsstrategie: Studie im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen. Berlin, Leipzig: IE.

IE – Institut für Energetik und Umwelt (2007b): Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse: Endbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin, Leipzig: IE.

IEA – International Energy Agency (2004): Biofuels for Transport. An International Perspective. Paris: IEA.

IEA – International Energy Agency (2006a): The Energy Situation in Brazil: An Overview. Paris: IEA.

IEA – International Energy Agency (2006b): World Energy Outlook 2006. Paris: IEA.

IEA – International Energy Agency (2007a): World Energy Outlook 2007. Paris: IEA.

IEA – International Energy Agency (2007b): IEA Energy Technology Essentials: Biomass for Power Generation and CHP. Internet: http://www.iea.org/textbase/techno/essentials3.pdf (gelesen am 12. Dezember 2007). Paris: IEA.

IEA – International Energy Agency (2007c): Renewables for Heating and Cooling. Paris: IEA.

IEA – International Energy Agency (2007d): World Energy Outlook 2007: Zusammenfassung: China and India Insights. Paris: IEA.

IEA – International Energy Agency (2008a): CHP/DHC Country Scorecard: Germany. The International CHP/DHC Collaborative. Paris: IEA.

IEA – International Energy Agency (2008b): Combined Heat & Power and Emissions Trading: Options for Policy Makers IEA Information Paper. Paris: IEA.

IEA – International Energy Agency (2008c): Statistics and Balances. Internet: http://www.iea.org/ (gelesen am 31. März 2008). Paris: IEA.

IEA – International Energy Agency und JREC – Johannesburg Renewable Energy Coalition (2008): Global Renewable Energy – Policies and Measures. Internet: http://www.iea.org/textbase/pm/grindex.aspx (gelesen am 01. April 2008). Paris: IEA, JREC.

IFEU – Institut für Energie und Umweltforschung (2007): Nachwachsende Rohstoffe für die chemische Industrie: Optionen und Potenziale für die Zukunft. Heidelberg: IFEU.

IFPRI – International Food Policy Research Institute, in 5.2.5.2 auch zitiert als Braun, von Braun, J., Ahmed, A., Asenso-Okyere, K., Fan, S., Gulati, A., Hoddinott, J., Pandya-Lorch, R., Rosegrant, M. W., Ruel, M., Torero, M., van Rheenen, T. und von Grebmer, K. (2008): Hohe Nahrungsmittelpreise – Konzept für die Wege aus der Krise. IFPRI Policy Paper, May 2008. Washington, D.C.: IFPRI.

Igelspacher, R., Antoni, D., Kroner, T., Prechtl, S., Schieder, D., Schwarz, W. H. und Faulstich, M. (2006): Bioethanolproduktion aus Lignocellulose. Stand der Technik und Perspektiven. BWK 58 (3), 50–54.

IGES – Institute for Global Environmental Strategies (2008): Kyoto Protocol Related Information. CDM/JI Project Data. Internet: http://www.iges.or.jp/en/cdm/report.html (gelesen am 13. Oktober 2008). Tokio: IGES.

IISc – Indian Institute of Science (2006): Experience With Gasifiers in India. Internet: http://cgpl.iisc.ernet.in/ (gelesen am 28. Juli 2007). Bangalore: IISc.

IISD – International Institute for Sustainable Development (2007): Summary of the Eighth Conference of the Parties to the Convention to Combat Desertification: 3–14 September 2007. New York: IISD.

IISD – International Institute for Sustainable Development (2008): Summary of the Sixteenth Session of the Commission on Sustainable Development (CSD-16), New York 5–16 May 2008 New York: IISD.

IMF – International Monetary Fund (2007): World Economic Outlook. Globalization and Inequality. Washington, DC: IMF.

Imhoff, M. L., Bounoua, L., Ricketts, T., Lucks, C., Harriss, R. und Lawrence, W. T. (2004): Global patterns in human consumption of net primary production. Nature 429 (24.06.), 870–873.

IMV – Institut for Miljøvurdering (2002): Assessing the Ecological Footprint. A Look at the WWF's Living Planet Report 2002. Kopenhagen: IMV.

Intelligent Energy (2007): Energy Services for Poverty Alleviation in Developing Countries. Brüssel: Intelligent Energy Europe.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2000): Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of IPCC. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2005): Carbon Dioxide Capture and Storage. A Special Report of Working Group III of the IPCC. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2006): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Internet: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm (gelesen am 09. November 2007). Genf: IPCC.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007a): Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007b): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007c): Climate Change 2007. Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fourth Assessment Report. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007d): Climate Change 2007: The Fourth Assessment Report of the IPCC. Summary for Policymakers. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

IRENA – Initiative for an International Renewable Energy Agency (2008): About IRENA. Internet: http://www.irena.org/irena.htm (gelesen am 01. September 2008). Berlin: IRENA.

ISAAA – International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications (2008): Globale Anbauflächen 2007: Weiter Zuwachs für gv-Pflanzen: Flächen steigen auf 114 Millionen Hektar. Internet: http://www.transgen.de/anbau/eu_international/531.doku.html (gelesen am 08. Juli 2008). Aachen: TransGen Wissenschaftskommunikation.

ISET – Institut für Solar Energieversorgungstechnik (2008): Biogasaufbereitung zu Biomethan. 6. Hanauer Dialog. Tagungsband. Kassel, Hanau: ISET.

ITADA – Grenzüberschreitendes Institut zur rentablen umweltgerechten Landbewirtschaftung (2005): Nachhaltige Maisproduktion am Oberrhein: Konzeption und vertiefte Auswertung von Anbausystemen. Abschlussbericht Projekt 3. Grenzüberschreitendes Institut zur rentablen umweltgerechten Landbewirtschaftung. Colmar, Frankreich: ITADA.

ITTO – International Tropical Timber Council (Hrsg.) (2006): Status of Tropical Forest Management 2005. Yokohama, Japan: ITTO.

Iturregui, P. und Dutschke, M. (2005): Liberalisation of Environmental Goods & Services and Climate Change. Hamburg Institute of International Economics (HWWA) Discussion Paper 335. Hamburg: HWWA.

IUCN – The World Conservation Union (Hrsg.) (1994): Guidelines for Protected Areas Management Categories. Gland: IUCN.

IUCN – The World Conservation Union (2003): WPC Outputs. The Durban Accord. World Parks Congress 2003. Gland: IUCN.

IWMI – International Water Management Institute (Hrsg.) (2007): Water for Food. Water for Life. A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London, New York: Earthscan.

IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (2007): Stoffliche oder energetische Nutzung? Nut-

zungskonkurrenz um die Ressource Holz. Holzwende Paper. Berlin: IZT.

Jackson, R. B., Jobbágy, E. G., Avissar, R., Roy, S. B., Barrett, D. J., Cook, C. W., Farley, K. A., le Maitre, D. C., McCarl, B. A. und Murray, B. C. (2005): Trading water for carbon with biological carbon sequestration. Science 310, 1944–1947.

Jagadish, K. S. (2004): The Development and Dissemination of Efficient Domestic Cook Stoves and Other Devices in Karnataka. Department of Civil Engineering and Centre for Sustainable Technologies, Indian Institute of Science, Bangalore. Bangalore: Indian Academy of Sciences.

James, A. N., Gaston, K. J. und Balmford, A. (1999): Balancing the Earth's account. Science 401, 323.

Jarnagin, S. T. (2004): Regional and global patterns of population, land use, and land cover change. GIScience and Remote Sensing 41, 207–227.

Jauhiainen, J., Takashi, H., Heikkinen, J. E. P., Martikainen, P. J. und Vasander, H. (2005): Carbon fluxes from a tropical peat swamp forest floor. Global Change Biology 11, 1788-1797.

JIKO – Joint Implementation Koordinierungsstelle im Bundesumweltministerium (2007): The Bali CDM Agenda – Cleaning up the Leftovers? JIKO 4, 1–6.

JIKO – Joint Implementation Koordinierungsstelle im Bundesumweltministerium (2008): Komplex und kostenintensiv in der Entwicklung: Eine Kommentierung der CDM-Methoden für den Verkehrssektor. JIKO 4, 1–10.

Johnson, F., Seebaluck, V., Watson, H. und Woods, J. (2006): Bio-ethanol from sugarcane and sweet sorghum in Southern Africa: agro-industrial development, import substitution and export diversification. In: ICTSD Project on Trade and Sustainable Energy (Hrsg.): Linking Trade, Climate Change and Energy. ICTSD Project on Trade and Sustainable Energy. Genf: International Centre for Trade and Sustainable Development (ICTSD), 23–24.

Jonsell, M., Hansson, J. und Wedmo, L. (2007): Diversity of saproxilic beetle species in logging residues in Sweden – comparisons between tree species and diameters. Biological Conservation 138, 89–99.

Joos, F. (2002): CO_2 Impulse Response Function of Bern SAR and Bern TAR Models. Internet: http://unfccc.int/resource/brazil/carbon.html (gelesen am 13. Oktober 2008). Genf: United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).

Jorgensen, J. R., Deleuran, L. C. und Wollenberger, B. (2007): Prospects of whole grain crops of wheat, rye and triticale under different fertilizer regimes for energy production. Biomass and Bioenergy 31, 308–317.

Jull, C., Redondo, P. C., Mosoti, V. und Vapnek, J. (2007): Recent Trends in the Law and Policy of Bioenergy Production, Promotion and Use. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Jungbluth, N., Büsser, S., Frischknecht, R. und Tuchschmid, M. (2008): Ökobilanz von Energieprodukten: Life Cycle Assessment of Biomass-to-Liquid Fuels. Final Report. Uster: ESU-Services Ltd.

Jürgens, I., Schlamadinger, B. und Gomez, P. (2006): Bioenergy and the CDM in the emerging market for carbon credits. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 11, 1051–1081.

Kägi, T., Freiermuth Knuchel, R., Nemecek, T. und Gaillard, G. (2007): Ökobilanz von Energieprodukten: Bewertung der landwirtschaftlichen Biomasse-Produktion (DRAFT).

Kaiser, M. (2008): Entwaldung stoppen. In: FUE – Forum Umwelt und Entwicklung (Hrsg.): Im Labyrinth der Labels. Nachhaltigkeit durch Zertifizierung? Rundbrief Forum Umwelt & Entwicklung 3/2008. Bonn: Projektstelle Umwelt & Entwicklung, 22–23.

Kaltner, F. J., Azevedo, G. F. P., Campos, I. A. und Mundim, A. O. F. (2005): Liquid Biofuels for Transportation in Brazil. Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century. Berlin, Eschborn: BMELV, GTZ.

Kaltschmitt, M. und Hartmann, H. H. (Hrsg.) (2003): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

Kejun, J., Xiulian, H., Xianli, Z., Garg, A., Halsnaes, K. und Qiang, L. (2007): Balancing Energy, Development and Climate Priorities in China: Current Status and the Way Ahead. Roskilde: UNEP Risoe Centre on Energy, Climate and Sustainable Development.

Keyzer, M. A., Merbis, M. D., Pavel, I. F. P. W. und van Wesenbeeck, C. F. A. (2005): Diet shifts towards meat and the effects on cereal use: Can we feed the animals in 2030? Ecological Economics 55 (2), 187–202.

KfW Bankengruppe (2008): Agrartreibstoffe und Entwicklung – Positionsbestimmung für die FZ. Frankfurt/M.: KfW Bankengruppe.

Kiers, T. E., Leakey, R. R. B., Izac, A.-M., Heinemann, J. A., Rosenthal, E., Nathan, D. und Jiggins, J. (2008): Agriculture at crossroads. Science 320, 320f.

Kirby, K. R. und Potvin, C. (2007): Variation in carbon storage among tree species: Implications for the management of al small-scale carbon sink project. Forest Ecology and Management 246, 208–221.

Klein Goldewijk, C. G. M. und Battjes, J. J. (1997): A Hundred Year (1890–1990) Database for Integrated Environmental Assessments (HYDE Version 1.1). RIVM Report. The Hague: National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM).

Klein Goldewijk, K. (2001): Estimating global land use change over the past 300 years: the HYDE database. Global Biogeochem. Cycles 15, 417–433.

Klink, C. A. und Machado, R. B. (2005): Conservation of the Brazilian Cerrado. Conservation Biology 19 (3), 707–713.

Knappe, F., Böß, A., Fehrenbach, H., Giegrich, J., Vogt, R., Dehoust, G., Fritsche, U., Schüler, D. und Wiegmann, K. (2007): Stoffstrommanagement von Biomasseabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle. m Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA Texte 04/07. Darmstadt: Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg, Öko-Institut für angewandte Ökologie (IFEU).

Knoeff, H. (2005): Handbook Biomass Gasification: BTG Biomass Technology Group. Enschede: Biomass Technology Group (BTG).

Koh, L. P. und Wilcove, D. S. (2008): Is oil palm agriculture really destroying tropical biodiversity? Conservation Letters, im Druck.

Kojima, M. und Johnson, T. (2005): Potential for Biofuels for Transport in Developing Countries. Washington, DC: The World Bank Energy Sector Management Assistance Programme (ESMAP).

Koplow, D. (2007): Biofuels – At What Cost? Government Support for Ethanol and Biodiesel in the United States: 2007 Update. Genf: International Institute for Sustainable Development (IISD).

Krausmann, F., Erb, K.-H., Gingrich, S., Lauk, C. und Haberl, H. (2007): Global patterns of socioeconomic biomass flows in the year 2000: a comprehensive assessment of supply, consumptions and constraints. Ecological Economics 65, 471–487.

KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2006): Energiepflanzen. Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus. Darmstadt, Potsdam: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. und Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.

Kulessa, M. E. (2007): Setting efficient climate policy targets: mission possible? Intereconomics 42 (2), 64–71.

Kulessa, M. E. und Ringel, M. (2003): Kompensationen als innovatives Instrument globaler Umweltschutzpolitik: Möglichkeiten und Grenzen einer Weiterentwicklung des Konzepts am Beispiel der biologischen Vielfalt. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht 83, 263–285.

Kumar, R., Lokras, S. S. und Jagadish, J. S. (1990): Development, Analysis, Dissemination of a 3-Pan Cooking Stove. Bangalore: Centre for the Application of Science & Technology to Rural Areas (ASTRA).

Kutas, G., Lindberg, C. und Steenblik, R. (2007): Biofuels – At What Cost? Government Support for Ethanol and Biodiesel in the European Union: 2007 Update. Genf: International Institute for Sustainable Development (IISD).

La Rovere, E. L., Pereira, A. O., Simöes, A. F., Pereira, A. S., Garg, A., Halsnaes, K., Dubeu, X. und da Costa, R. C. (2007): Development First: Linking Energy and Emission Policies with Sustainable Development for Brazil. Internet: http://www.developmentfirst.org/Publications/DevelopEnergyClimate_Brazil.pdf (gelesen am 20. Oktober 2008). Roskilde: UNEP Risoe Centre on Energy, Climate and Sustainable Development.

Lal, R., Uphoff, N., Stewart, B. A. und Hansen, D. O. (2005): Climate Change and Global Food Security. Boca Raton: Taylor & Francis.

Lambin, E. F., Geist, H. J. und Lepers, E. (2003): Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. Annual Review of Environment and Resources 28, 205–241.

Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skaanes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkamp, T. A., Vogel, C. und Xu, J. (2001): The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. Global Environmental Change 11, 261–269.

Legutke, S. und Voss, R. (1999): The Hamburg Atmosphere-Ocean Coupled Circulation Model ECHO-G. Technical Reports. Hamburg: Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ).

Lehmann, J. (2007): A handful of carbon. Nature 447, 143–144.

Lehner, B. und Doll, P. (2004): Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. Journal of Hydrology 296 (1–4), 1–22.

Lemus, R. und Lal, R. (2005): Bioenergy crops and carbon sequestration. Plant Sciences Critical Reviews 24, 1–21.

Lepers, E., Lambin, E. F., Janetos, A. C., de Fries, R., Achard, F., Ramankutty, N. und Scholes, R. J. (2005): A synthesis of information on rapid land-cover change fort he period 1981–2000. BioScience 55, 115–124.

Leuschner, M. (2008): Regelwerk für Biogaseinspeisung bis auf EEG-Bonus komplett. Netzbetreiber ist gerüstet. BWK 60 (6), 21–23.

Levidow, L. und Paul, H. (2008): Land Use, Bioenergy and Agro-Biotechnology. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Welt im Wandel: Bioenergie und nachhaltige Landnutzung“. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex05.pdf. Berlin: WBGU.

Levine, M., Ürge-Vorsatz, D., Blok, K., Geng, L., Harvey, D., Lang, S., Levermore, G., Mongameli Mehlwana, A., Mirasgedis, S., Novikova, A., Rilling, J. und Yoshino, H. (2007): Residential and commercial buildings. In: Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R. und Meyer, L. A. (Hrsg.): Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge, New York: Cambridge University Press, 387–446.

Lewandowski, I. und Faaij, A. P. C. (2006): Steps towards the development of a certification system for sustainable bioenergy trade. Biomass & Bioenergy 30, 83–104.

Lewandowski, I. und Schmidt, U. (2006): Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. Agriculture Ecosystems & Environment 112, 335–346.

LfL Bayern – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2008): Basisdaten – für die Ermittlung des Düngebedarfs – für die Umsetzung der Düngeverordnung. Internet: http://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/mineralisch/10536/linkurl_0_9_0_0.pdf (gelesen am 16. Juni 2008). München LfL.

Lieberei, R., Reisdorff, C. und Franke, W. (2007): Nutzpflanzenkunde. Stuttgart, New York: Thieme.

Lindlein, P. (2007): Bioenergy for Development in Africa. Frankfurt/M.: international Consulting economists & engineers (iCee).

Lloyd, J. und Taylor, J. A. (1994): On the temperature-dependence of soil respiration. Functional Ecology 8 (3), 315–323.

Loose, C. und Korn, H. (2008): Von „Bonn nach Nagoya”: Bewährungsprobe für die Biodiversitätskonvention. In: Altner, G., Leitschuh-Fecht, H., Michelsen, G., Simonis, U. E. und von Weizsäcker, C. (Hrsg.): Jahrbuch Ökologie. Stuttgart: Hirzel, 57–67.

López-Claros, A. (2006): Global Competitiveness Report 2006–2007. Genf: World Economic Forum.

López-Hurtado, C. (2002): Social labelling and WTO law. Journal of International Economic Law 5, 719–746.

López-Ulloa, M., Veldenkamp, E. und de Koning, G. H. (2005): Soil carbon stabilization in coverted tropical pastures and forests depends on soil type. Soil Science Society of America Journal 69, 1110–1117.

Low, T. und Booth, C. (2007): The Weedy Truth About Biofuels. Melbourne: The Invasive Species Council.

Loy, D. (2007): Energiepolitische Rahmenbedingungen für Strommärkte und erneuerbare Energien – 23 Länderanalysen. Eschborn: GTZ.

Lucht, W., Prentice, I. C., Myneni, R. B., Sitch, S., Friedlingstein, P., Cramer, W., Bousquet, P., Buermann, W. und Smith, B. (2002): Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. Science 296 (5573), 1687–1689.

Luhnow, D. und Samor, G. (2006): As Brazil fills up on Ethanol, it weans off energy imports. The Wall Street Journal, Washington, DC.

Lula da Silva, I. (2007): Brazil’s President Lula on Trade, Agriculture, Poverty and Biofuels. Interview Europaen Parlimant, 05.07.2007. Internet: http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?language=EN&type=IM-PRESS&reference=20070703STO08738&secondRef=0 (gelesen am 02. Juli 2008). Brüssel: European Parliament.

Lundqvist, J., de Fraiture, C. und Molden, D. (2008): Saving Water: From Field to Fork – Curbing Losses and Wastage in the Food Chain. SIWI Policy Brief. Stockholm: Stockholm International Water Institute (SIWI).

Lunnan, A., Stupak, I., Asikainen, A. und Raulund-Rasmussen, K. (2008): Introduction to sustainable utilisation of

forest energy. In: Röser, D., Asikainen, A., Raulund-Rasmussen, K. und Stupak, I. (Hrsg.): Sustainable Use of Forest Biomass for Energy. A Synthesis With Focus on the Baltic and Nordic Region. Berlin, Dordrecht: Springer, NN.

LUT – Lappeenranta University of Technology (2008): International Bioenergy Technology in cooperation with University of Joensuu. Internet: http://www.lut.fi/en/international_students/master_programmes/ente.html (gelesen am 07. Juni 2008). Lappeenranta, Finnland: LUT.

Luyssaert, C., Schulze, E.-D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P. und Grace, J. (2008): Old-growth forests as global carbon sinks. Nature 455, doi:10.1038/nature07276.

LWF – Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2005): Anbau von Energiewäldern. LWF Merkblatt 19. Internet: http://www.lwf.bayern.de/imperia/md/content/lwf-internet/veroeffentlichungen/lwf-merkblaeter/19/lwf_merkblatt_19.pdf (gelesen am 16. Juni 2008). Freising: LWF.

MA – Millennium Ecosystem Assessment (2005a): Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis Report. Washington, DC: Island Press.

MA – Millennium Ecosystem Assessment (2005b): Ecosystems and Human Well-Being. Biodiversity Synthesis. Washington, DC: World Resources Institute (WRI).

MA – Millennium Ecosystem Assessment (2005c): Ecosystems and Human Well-Being: Current States & Trends. Washington, DC: Island Press.

MA – Millennium Ecosystem Assessment (2005d): Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water. Synthesis. Washington, DC: Island Press.

MA – Millennium Ecosystem Assessment (2005e): Ecosystems and Human Well-Being: Desertification Synthesis. Washington, DC: MA.

Mack, R. N., Simberloff, D., Lonsdale, W. M., Evans, H., Clout, M. und Bazzaz, F. (2000): Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences and control. Issues in Ecology (5), 22.

Maeder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried., P. und Niggli, U. (2002): Soil fertility and biodiversity in organic farming. Science 296, 1694–1697.

Maier, J. (2007): CSD 2007 endet ergebnislos Analyse eines Scheiterns. Rundbrief Forum Umwelt und Entwicklung II. Bonn: Forum Umwelt und Entwicklung.

Maier, J. (2008): Nachhaltige Biokraftstoffe – gibt's das überhaupt? In: FUE – Forum Umwelt und Entwicklung (Hrsg.): Im Labyrinth der Labels. Nachhaltigkeit durch Zertifizierung? Rundbrief Forum Umwelt & Entwicklung 3/2008. Bonn: Projektstelle Umwelt & Entwicklung, 10–11.

Mande, S. und Kishore, V. V. N. (2007): Towards Cleaner Technologies: A Process Story on Biomass Gasifiers for Heat Applications in Small and Micro Enterprises. New Delhi: The Energy and Resources Institute (TERI).

Manley, J., van Kooten, G. C., Moeltner, K. und Johnson, D. W. (2005): Creating carbon offsets in agriculture through no-till cultivation: a meat-analysis of costs and carbon benefits. Climatic Change 68, 41–65.

Mann, L. und Tobert, V. (2000): Soil sustainability in renewable biomass plantings. Ambio 29, 492–498.

Marris, E. (2006): Black is the new green. Nature 442, 624–626.

Mathews, J. A. (2007): Biofuels: what a biopact between North and South could achieve. Energy Policy 35, 3550–3570.

Matson, P. A., Parton, W. J., Power, A. G. und Swift, M. J. (1997): Agricultural intensification and ecosystem properties. Science 277, 504–509.

Matthews, E., Payne, R., Rohweder, M. und Murray, S. (2000): Forest Ecosystems. Pilot Analysis of Global Ecosystems. Washington, DC: World Ressources Institute (WRI).

Maxwell, S. (2008): Downing Street Seminar on Food Prices. Power Point Presentation on 22 April. . London: Downing Street Seminar Group.

McCornick, P., Awulachew, S. B. und Abebe, M. (2008): Water – food – energy – environment synergies and trade-offs: major issues and case studies. Water Policy 10 (Supplement 1), 23–36.

McNeely, J. (2008): Protected areas in a world of eight billion. GAIA 17 (S1), 104–106.

MDA – Ministério do Desenvolvimento Agrário (2008): Selo Combustível Social. Portal da Secretaria da Agricultura Familial. Internet: http://www.biodiesel.gov.br/ (gelesen am 15. August 2008). Brasil: Governo Federal do Brasil.

Meade, B. und Rosen, S. (1997): The influence of income on global food spending. Economic Research Service/USDA: Agricultural Outlook (Juli), 14–17.

Melis, A. und T., H. (2001): Hydrogen production. Green Algae as a source of energy. Plant Physiology 127, 740–748.

MEMD – Ministry of Energy and Mineral Development (2002): Energy Policy. Internet: http://www.energyandminerals.go.ug/EnergyPolicy.pdf Kampala: MEMD.

MEMD – Ministry of Energy and Mineral Development (2004): Uganda Energy Balance. Kampala: MEMD.

MEMD – Ministry of Energy and Mineral Development (2007): Renewable Energy Policy – 2007. Kampala: MEMD.

Mendez, M. A. und Popkin, B. (2004): Globalization, urbanization and nutritional change in developing world. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Hrsg.): Globalization of Food Systems in Developing Countries – Impact on Global Food Security and Nutrition. Food and Nutrition Paper. Rom: FAO, 55–80.

Meó Corporate Development (2008): International Sustainability and Carbon Certification Project. Internet: http://www.iscc-project.org/projekt (gelesen am 30. April 2008). Köln: Meó Corporate Development.

Meyer, W. B. (1995): Past and present land use and land cover in the USA. Consequences 1 (1).

Mildner, S.-A. und Zilla, C. (2007): Brasilien und Biokraftstoffe. Chancen und Stolpersteine für eine engere Zusammenarbeit mit der EU und Deutschland. SWP-Aktuell A 60 (November), 4.

Ministry of Agriculture (2008): Distribution of Agricultural Land by Different Usages in India From 1950–1951 to 1999–2000. New Delhi: Ministry of Agriculture. Department of Statistics.

Ministry of Agriculture Livestock and Food Supply (2006): Brazilian Agroenergy Plan 2006–2011. Internet: http://www.agricultura.gov.br/pls/portal/docs/PAGE/MAPA/PLANOS/PNA_2006_2011/PLANO%20NACIONAL%20DE%20AGROENERGIA%202006%20-%202011-%20INGLES_1_0.PDF (gelesen am 27. Februar 2008). Brasilia: Brazilian Ministry of Agriculture Livestock and Food Supply,.

Ministry of Rural Development (2003): Wasteland Atlas. Internet: http://dolr.nic.in/fwastecatg.htm (gelesen am 4. April 2008). New Delhi: Ministry of Rural Development.

Misereor (2007): „Bioenergie" im Spannungsfeld von Klimawandel und Armutsbekämpfung. Aachen: Bischöfliches Hilfswerk Misereor.

Mitchell, D. (2008): A Note on Rising Food Prices. Washington, D.C.: World Bank.

Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Brooks, T. M., Pilgrim, J. D., Konstant, W. R., da Fonseca, G. A. B. und Kormos, C. (2003): Wilderness and biodiversity conservation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 100 (18), 10309–10313.

Mittermeier, R. A., Myers, N., Gil, P. R. und Goettsch Mittermeier, C. (1999): Hotspots: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions. Sierra Madre: Cemex.

Mittermeier, R. A., Robles Gil, P., Hoffmann, M., Pilgrim, J., Brooks, J., Goettsch Mittermeier, C., Lamoreux, J. und Da Fonseca, G. A. B. (2004): Hotspots Revisited: Earth's Biologically Riches and Most Endangered Terrestrial Ecoregions. Conservation International.

Mittler, D. (2008): Schwach, schwächer, CSD? Die Kommission für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Natione 15 Jahre nach Rio. Vereinte Nationen 56 (1), 16–19.

MME – Ministério de Minas e Energia (2008): Boletim Mensal Dos Combustíveis Renováveis. Edição no.7, Julho 2008. Brasilia: MME.

MME – Ministério de Minas e Energia und EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2007): Balanço Energético Nacional 2007: Ano Base 2006. Relatório Final. Rio de Janeiro: MME, EPE.

MoEF – Ministry of Environment and Forest (2006): Report of the National Forest Commission. New Delhi: MoEF.

Molnar, A., Scherr, S. und Khare, A. (2004): Who Conserves the World Forests? Community Drive Strategies to Protect Forests and Respect Rights. Forest Trends. Washington, DC: Forest Trends.

Monfreda, C., Ramankutty, N. und Foley, J. A. (2008): Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. Global Biogeochemical Cycles 22, doi:10.1029/2007GB002947.

Montenegro, A., Brovkin, V., Eby, M., Archer, D. und Weaver, A. J. (2007): Long term fate of anthropogenic carbon. Geophysical Research Letters 34, doi:10.1029/2007GL 030905.

Mooney, H. A., Lubchenco, J., Dirzo, R. und Sala, O. E. (1995): Biodiversity and ecosystem functioning: Ecosystem analysis. In: Heywood, V. H. und Watson, R. T. (Hrsg.): Global Biodiversity Assessment. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 275–325.

Morgan, T. (2007): Energy Subsidies: Their Magnitude, How they Affect Energy Investment and Greenhouse Gas Emissions, and Prospects for Reform. Menecon Consulting. Final Report Commissioned by UNFCCC Secretariat Financial and Technical Support Programme. New York: UNFCCC Secretariat.

Moritz, C., Patton, J. L., Conroy, C. J., Parra, J. L., White, G. C. und Beissinger, S. R. (2008): Impact of a century of climate change on small-mammal communities in Yosemite National Park, USA. Science 322, 261–263.

Morton, D. C., DeFries, R., Shimabukuro, Y. E., Anderson, L. O., Arai, E., del Bon Espirito-Santo, F., Freitas, R. und Morisette, J. (2006): Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. PNAS 103, 14637–14641.

Müller, A. (2008): Biofuels – driver of rural development? Rural 21 (3), 12–15.

Müller-Langer, F., Perimenis, A., Brauer, S., Thrän, D. und Kaltschmitt, M. (2008): Technische und Ökonomische Bewertung von Bioenergie-Konversionspfaden. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Welt im Wandel: Bioenergie und nachhaltige Landnutzung". Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex06.pdf. Berlin: WBGU.

Münch, J. (2008): Nachhaltig nutzbares Getreidestroh in Deutschland. Heidelberg: Institut für Energie und Umweltforschung (IFEU).

Murphy, S. und Suppan, S. (2003): Introduction to the Development Box: Finding Space for Development Concerns in the WTO's Agriculture Negotiations. Manitoba: Institute for Agriculture and Trade Policy, International Institute for Sustainable Development (IISD).

Murray, C. C. und López, A. D. (Hrsg.) (1996): The Global Burden of Disease. Harvard, MA: Harvard University Press.

Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., de Fonseca, G. A. B. und Kent, J. (2000): Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature 403 (24. Februar), 853–858.

Nabuurs, G. J., Masera, O., Andrasko, K., Benitez-Ponce, P., Boer, R., Dutschke, M., Elsiddig, E., Ford-Robertson, J., Frumhoff, P., Karjalainen, T., Krankina, O., Kurz, W. A., Matsumoto, M., Oyhantcabal, W., Ravindranath, N. H., Sanz Sanchez, M. J. und Zhang, X. (2007): Forestry. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.): Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 541–584.

Nakicenovic, N. und Swart, R. (2000): Emissions Scenarios. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Namburete, S. H. E. (2006): Mozambique Bio-Fuels: African Green Revolution Conference Oslo-Norway, 31 August–02 September 2006. Presentation by H.E. Salvador Namburete, Minister of Energy Republic of Moçambique (Power Point Präsentation). Internet: mediabase.edbasa.com/kunder/yaraimages/agripres/agripres/agripres/j2006/m09/t04/0000443_2.pdf (gelesen am 07. Oktober 2008). Moçambique: Ministry fo Energy.

Neef, T., Eichler, L., Deecke, I. und Fehse, J. (2007): Update on Markets for Forestry Offsets. Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Ensenanza (CATIE).

Nepstad, D. C., Sticker, C. M., Soares-Filho, B. und Merry, F. (2008): Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B 363, 1737–1746.

New, M., Hulme, M. und Jones, P. (2000): Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. Journal of Climate 13 (13), 2217–2238.

NFA – National Forestry Authority (2006): NFA Should Not be Blamed For Forest Degradation. Internet: http://www.nfa.org.ug/new.phpsubaction=showfull&id=1162988114&archive=&start_from=&ucat=1& (gelesen am 4. April 2008). Kampala: NFA.

Ng, F. und Aksoy, M. A. (2008): Who are the Net Food Importing Countries? Policy Research Working Paper 4457. Washington, DC: World Bank.

NGA – National Governors Association (2008): Greener Fuels, Greener Vehicles: A State Resource Guide. Washington, DC: NGA.

Nitsch, J. (2007): Leitstudie 2007 „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien" Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick 2050. Stuttgart, Berlin: DLR, BMU.

Nordic Ecolabel (2008): How to Apply for the Swan? Internet: http://www.ecolabel.nu/nordic_eco2/testing/how_to_app/ (gelesen am 05. August 2008). Oslo, Stockholm: Nordic Ecolabel.

ÖBB – Österreichische Bundesbahnen (2008): Geschäftsbericht 2007. Internet: http://www.railcargo.at/de/Ueber_uns/Geschaeftsbericht/Downloads/Geschaeftsbericht_2007.pdf (gelesen am 18. September 2008). Wien: ÖBB-Holding AG.

ODI – Overseas Development Institute (2008): Rising Food Prices: A Global Crisis. Briefing Paper 37. London: ODI.

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2002): Aid Targeting the Objectives of the Rio Conventions 1998–2000. A Contribution by the DAC Secretariat for the Information of Participants at the World Summit for Sustainable Development in Johannesburg in August 2002. Paris: OECD.

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2003): Philanthropic foundations and development co-operation. DAC Journal 4 (3), off-print.

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2005): Environmentally Harmful Subsidies: Challenges for Reform. Paris: OECD.

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2008): Economic Assessment of Biofuel Support Policies. Paris: OECD Directorate for Trade and Agriculture.

OECD – Organisation for Economic Cooperation and Development und FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2005): OECD–FAO Agricultural Outlook 2005–2014. Paris, Rom: OECD, FAO.

OECD – Organisation for Economic Cooperation and Development und FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006): OECD–FAO Agricultural Outlook 2006–2015. Paris, Rom: OECD, FAO.

OECD – Organisation for Economic Cooperation and Development und FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (Hrsg.) (2007): OECD–FAO Agricultural Outlook 2007–2016. Paris: OECD.

Oeding, D. und Oswald, B. (2004): Elektrische Kraftwerke und Netze. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

Oelmann, Y., Wilcke, W., Temperton, V. M., Buchmann, N., Roscher, C., Schumacher, J., Schulze, E.-D. und Weisser, W. W. (2007): Soil and plant nitrogen pools as related to plant diversity in an experimental grassland. Soil Science Society of America 71, 720–729.

Olaki, E. (2008): Uganda: Cabinet Okays Oil, Gas Policy. Internet: http://allafrica.com/stories/200802041132.html (gelesen am 4. April 2008). Kampala: New Vision.

Oldeman, L. R. (1992): Global Extent of Soil Degradation. ISRIC Bi-Annual Report 1991–1992. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (ISCRIC).

Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A. und Sombroek, W. G. (1991): World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation. Global Assessment of Soil Degradation GLASOD. Wagingen, Niederlande: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).

Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, F., Ricketts, T., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P. und Kassem, K. R. (2001): Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth. BioScience 51 (11), 933–938.

Ong, C. K., Black, C. R. und Muthuri, C. M. (2006): Modifying forestry and agroforestry to increase water productivity in the semi-arid tropics. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources 1 (65), 19ff.

Openshaw, K. (2000): A review of Jatropha curcas: an oil plant of unfulfilled promise. Biomass and Bioenergy 19, 1–15.

Pacala, S. und Socolow, R. (2004): Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. Science 305, 968–972.

Pagiola, S. (2002): Paying for water services in Central America: learning from Costa Rica. In: Pagiola, S., Bishop., J. und Landell-Mills, N. (Hrsg.): Selling Forest Environmental Services. Market-based Mechanisms for Conservation and Development. London: Earthscan, 37–62.

Palosuo, T., Peltoniemi, M., Mikhailov, A., Komarov, A., Faubert, P., Thürig, E. und Lindner, M. (2008): Projecting effects of intensified biomass extraction with alternative modelling approaches. Forest Ecology and Management 255, 1423–1433.

Paquin, M. (2007): Advocacy for Sustainable Biofuels: Roles and Functions for UNCCD Actors in the Light of the Ten-Year Strategic Plan. Vortrag auf der 8. VSK der UNCCD in Madrid, 6.9.07, UNISFERA. Montreal: UNISFERA.

Parmesan, C. und Yohe, G. (2003): A globally coherent fingrprint of climate change impacts across natural systems. Nature 421 (2.1.), 37–42.

Parrish, D. J. und Fike, J. H. (2005): The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. Critical Reviews in Plant Sciences 24, 423–459.

Pastowski, A., Fischedick, M., Arnold, K., Bienge, K., von Geibler, J., Merten, F. und Schüwer, D. (2007): Sozial-ökologische Bewertung der stationären energetischen Nutzung von importierten Biokraftstoffen am Beispiel von Palmöl. Wuppertal: Wuppertal Institut.

Paul, N. (2008): Pflanzensprit mit Ökolabel? Umwelt aktuell 3, NN.

Paustian, K., Six, J., Elliott, E. T. und Hunt, H. W. (2000): Management options for reducing CO_2 emissions from agricultural soils. Biogeochemistry 48, 147–163.

Pearce, D. (2003): The social cost of carbon and its policy implication. Oxford Review of Economic Policy 19 (3), 362–384.

Pearce, D. (2004): Environmental market creation: saviour or oversell? Portuguese Economic Journal 3 (2), 115–144.

Pearce, D. (2007): Do we really care about biodiversity? Environment and Resource Economics 37, 313–333.

Peksa-Blanchard, M., Dolzan, P., Grassi, A., Heinimö, J., Junginger, M., Ranta, T. und Walter, A. (2007): Global Wood Pellets Markets and Industry: Policy Drivers, Market Status and Raw Material Potential. IEA Bioenergy Task 40. Paris: International Energy Agency (IEA).

Peoples Coalition (2008): Peoples Coalition in Biofuels. Open Letter to Minister For New and Renewable Energy for Pro-People Energy Policy, Febuary 2008. Internet: http://www.ddsindia.com/www/people_coalition.html (gelesen am 03. Juli 2008). Hyderabad, Indien: Deccan Development Society (DDS).

Peregon, A., Maksyutov, S., Kosykh, N. P. und Mironycheva-Tokareva, N. P. (2008): Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in western Siberia. Journal of Geophysical Research 113, doi:10.1029/2007JG000441.

Pereira, R., Zweede, J., Asner, G. P. und Keller, M. (2002): Forest canopy damage and recovery in reduced-impact logging and conventional selective logging in Eastern Para, Brazil. Forest Ecology and Management 168, 77–89.

Perrings, C. und Gadgil, M. (2005): Conserving biodiversity: reconciling local and global benefits. In: Kaul, I., Coneicao, K., Le Goulven, K. und Mendoza, R. U. (Hrsg.): Providing Global Public Goods Managing Globalization. New York: United Nations Development Programme (UNDP), 532–555.

Perrot-Maître, D. und Davis, P. (2001): Case Studies: Developing Markets for Water Services from Forests. Washington, DC: Forest Trends.

Pesambili, C., Magessa, F. und Mwakabuta, N. (2003): Sazawa Charcoal Stove Designed for Efficient Use of Charcoal. Internet: http://www.io.tudelft.nl/research/dfs/ide-conference/papers/11_Mwakabuta.pdf (gelesen am 27. Februar 2008). Delft: TU Delft.

Peskett, L., Slater, R., Stevens, C. und Dufey, A. (2007): Biofuels, agriculture and poverty reduction. ODI Natural Resource Perspectives 107, 6.

Peters, C. J., Wilkins, J. L. und Fick, G. W. (2007): Testing a complete-diet model for estimating the land resource requirements of food consumption and agricultural carrying capacity – the New York State example. Renewable Agriculture and Food Systems 22 (2), 145–153.

Pfahl, S., Oberthür, S., Tänzler, D., Kahlenborn, W. und Biermann, F. (2005): Die internationalen institutionellen Rahmenbedingungen zur Förderung erneuerbarer Energien. Berlin: adelphi Research.

Philibert, C. (2004): International Energy Technology Collaboration and Climate Change Mitigation. JT00165457. COM/ENV/EPOC/IEA/SLT(2004)1. Paris: OECD Environment Directorate.

Phillips, A. und Stolton, S. (2008): Protected landscapes and biodiversity values: an overview. In: Amend, T., Brown, J. H., Kothari, A., Phillips, A. und Stolton, S. (Hrsg.): Values of Protected Landscapes and Seascapes. Protected Landscapes and Agrobiodiversity Values. Heidelberg: Kasparek Verlag, 8–21.

Pickardt, T. und de Kathen, A. (2002): Verbundprojekt „Grundlagen für die Risikobewertung transgener Gehölze“: Literaturstudie zur Stabilität transgen-vermittelter Merkmale in gentechnisch veränderten Pflanzen mit Schwerpunkt transgene Gehölzarten und Stabilitätsgene. Internet: http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-l/2181.pdf (gelesen am 16. Juni 2008). Berlin: Umweltbundesamt (UBA).

Pielke, R. A., Marland, G., Betts, R. A., Chase, T. N., Eastman, J. L., Niles, J. O., Niyogi, D. D. S. und Running, S. W. (2002): The influence of landuse change and landscape dynamics on the climate system: Relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A 360, 1705–1719.

Pilardeaux, B. (2004): Entwicklungslinien internationaler Süßwasserpolitik. In: Lozán, J. L., Graßl, H., Hupfer, P., Menzel, L. und Schönwiese, C.-D. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Hamburg: Wissenschaftliche Kooperationen, 316–319.

Pilardeaux, B. (2008): Konvention gegen Wüstenbildung: 8. Vertragsstaatenkonferenz 2007. Vereinte Nationen 56 (1), 29–30.

Pistorius, R., Schmitt, C. B. und Winkel, G. (2008): A Global Network of Forest Protected Areas Under the CBD – Analysis and Recommendation. Freiburg: Institute of Forest and Environmental Policy (IFP).

Pitman, A., Pielke sr, R., Avissar, R., Claussen, M., Gash, J. und Dolman, H. (1999): The role of the land surface in weather and climate: does the land surface matter? IGBP Newsletter 39, 4–9.

Planning Comission (2003): Report of the Committee on the Development of Biouel. New Delhi: Government of India.

Poore, M. E. D. und Fries, C. (1985): The Ecological Effects of Eucalyptus. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Pope, V. D., Gallani, M. L., Rowntree, P. R. und Stratton, R. A. (2000): The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. Climate Dynamics 16 (2), 123–146.

Popkin, B. (2006): Global nutrition dynamics: the world is shifting rapidly towards a diet linked with noncommunicable diseases. The American Journal of Clinical Nutrition 84 (2), 289–298.

Porter, M. E., Schwab, K. und Sala-i-Martin, X. (2007): The Global Competitiveness Report 2007–2008 World Economic Forum. Houndmills: Palgrave Macmillan.

Portmann, F., Siebert, S., Bauer, C. und Döll, P. (2008): Global data set of monthly growing areas of 26 irrigated crops. Frankfurt am Main, Germany: Institute of Physical Geography, University of Frankfurt.

Puth, S. (2003): WTO und Umwelt. Die Produkt-Prozess-Doktrin. Berlin: Duncker & Humblot.

Puth, S. (2005): Der Umweltschutz im Recht der WTO. Baden-Baden: Nomos.

Qin, J. (2007): WTO Panel decision in Brazil – Tyres supports safeguarding environmental values. ASIL Insight 11//23. Internet: http://asil.org//insights//2007//09//insights070905.html (gelesen am 12. September 2007). Washington. DC: American Society of International Law.

Raghu, S., Anderson, R. C., Daehler, C. C., Davis, A., Wiedenmann, R. N., Simberloff, D. und Mack, R. N. (2008): Adding biofuels to the invasive species fire? Science 313, 1742.

Raison, R. J. (2005): Demonstrating the Sustainability of Forest Bioenergy Projects. Bioenergy Australia Conference (Melbourne). Sustainability Guide and Industry Code of Practice for ‘Energy from Waste’ Projects *(Regie: Quelle nicht sicher -> Sabina)*. Internet: http://www.wmaa.asn.au/efw/home.html (gelesen am 20. Oktober 2008). Burwood, NSW: Waste Management Association of Australia.

Ramankutty, N., Evan, A. T., Monfreda, C. und Foley, J. A. (2008): Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. Global Biogeochemical Cycles 22, GB1003.

Ramankutty, N. und Foley, J. A. (1999): Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992. Global Biogeochemical Cycles 13, 997–1027.

Randall, R. (2004): Jatropha curcas (physic nut) Its Weed Potential in Western Australia and The Implications of Large Scale Plantations for Fuel oil Production. Perth: Department of Agriculture,Western Australia.

Rat der Europäischen Union (2008): Presidency Suggestions for a Common Scheme of Sustainability Criteria for Biofuels. 9 September 2008, Brüssel. Internet: http://register.consilium.europa.eu/pdf/en/08/st12/st12157-re01ad01.en08.pdf (gelesen am 15. Oktober 2008). Brüssel: Rat der Europäischen Union.

Redaktion Umwelt aktuell (2008): Biokraftstoffe II: Wachsender Druck auf die EU-Beimischungsziele. Umwelt aktuell (6), 15.

Reijnders, L. (2008): Ethanol production from crop residues and soil organic carbon. Resources, Conservation and Recycling 52, 653–658.

Reinhardt, G., Rettenmaier, N. und Gärtner, S. (2007): Regenwald für Biodiesel? Ökologische Auswirkungen der energetischen Nutzung von Palmöl. Frankfurt/M.: WWF Deutschland.

Reinicke, W. und Reinicke, H. (1998): Global Public Policy. Governing Without Government. Washington, DC: Brookings Institution Press.

Reisner, Y., de Filippi, R., Herzog, F. und Palma, J. (2007): Target regions for silvoarable agroforestry in Europe. Ecological Engineering 29, 401–418.

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2006): Global Status Report 2006 Update. Renewables. Paris: REN21 Secretariat

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2008): Renewables Global Status Report. Internet: http://gsr.ren21.net/index.php?title=Main_Page (gelesen am 2. September 2008). Paris: REN21 Sekretariat.

Ressortarbeitsgruppe Welternährungslage (2008): Globale Ernährungssicherungdurch nachhaltige Entwicklung und Agrarwirtschaft. Bericht der Ressortarbeitsgruppe „Welternährungslage“ an das Bundeskabinett. Berlin: Ressortarbeitsgruppe Bundesregierung „Welternährungslage“.

Reuters (2007): South Africa Biofuel Plan Upsets Monsanto, Maize Farmers. Internet: http://www.reuters.com/article/rbsConsumerGoodsAndRetailNews/idUSL1148171420071211 (gelesen am 17. Januar 2008). London: Reuters.

RFA – Renewable Fuels Association (2008): U.S. Fuel Ethanol Imports by Country. Industry Statistics. Internet: http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/#F (gelesen am 12. August 2008). Washington, DC: RFA.

Rhodes, J. S. und Keith, D. W. (2005): Engineering economic analysis of biomass IGCC with carbon capture and storage. Biomass and Bionergy 29, 440–450.

Ribeiro, H. (2008): Sugar cane burning in Brazil: respiratory health effects. Revista de Saúde Pública 42 (2), 370–376.

Righelato, R. und Spracklen, D. V. (2007): Carbon mitigation by biofuels or by saving and restoring forests? Science 317, 902.

Ringel, M. (2004): Energie und Klimaschutz. Umweltökonomische Analyse der Klimaschutzmaßnahmen auf dem deutschen Elektrizitätsmarkt unter Berücksichtigung internationaler Erfahrungen. Frankfurt/M.: Peter Lang.

Rockström, J., Lannerstad, M. und Falkenmark, M. (2007): Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries. PNAS 104, 6253–6260.

Rodrigues, A. S. L., Andelman, S. J., Bakarr, M. I., Boltani, L., Brooks, T. M., Cowling, R. M., Fishpool, L. D. C., da Fonseca, G. A. B., Gaston, K. J., Hoffmann, M., Long, J. S., Marquet, P. A., Polgrim, J. D., Pressey, R. L., Schipper, J., Sechrest, W., Stuart, S. N., Underhill, L. G., Waller, R. W., Watts, M. E. J. und Yan, X. (2004): Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity. Nature 428 (8.4.), 641–643.

Roe, D. (2006): Biodiversity, Climate Change and Complexity: An Opportunity for Securing Co-Benefits? . London: International Institute for Environment and Development (IIED).

Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U. und Tompkins, A. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5 – Part I: Model description. Hamburg: Max-Planck-Institut für Meteorologie.

Rogner, H.-H., Zhou, D., Bradley, R., Crabbé, P., Edenhofer, O., Hare, B., Kulipers, L. und Yamaguchi, M. (2007): Introduction. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.): Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 95–117.

Röhricht, C. und Ruscher, K. (2004): Anbauempfehlungen für schnellwachsende Baumarten. Fachmaterial Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. Fachbereich Pflanzliche Erzeugung. Internet: http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/858_1.pdf (gelesen am 16. Juni 2008). Leipzig: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.

Ronneburger, J.-U. (2008): Südamerika im Soja-Rausch – Rekorde bei Gewinn und Umweltzerstörung. dpa-Pressemeldung 24.04.2008. Internet: http://www.klima-aktiv.com/article144_5953.html (gelesen am 23. Juni 2008). Frankfurt/M.: dpa.

Rösch, C., Raab, K., Skarka, J. und Stelzer, V. (2007): Energie aus dem Grünland – eine nachhaltige Entwicklung? Wissenschaftliche Berichte FZKA 7333. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft.

Rosebala, A., Morillo, E., Undabeytia, T. und Maqueda, C. (2007): Long-term impacts of wastewater irrigation on Cuban soils. Soil Science Society of America Journal 71, 1292–1298.

Rosegrant, M. W. und Cavalieri, A. J. (2008): Bioenergy and Agro-Biotechnology. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Welt im Wandel: Bioenergie und nachhaltige Landnutzung“. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex07.pdf. Berlin: WBGU.

Rosegrant, M. W., Ewing, M., Msangi, S. und Zhu, T. (2008): Bioenergy and the Global Food Situation Until 2020/2050. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Welt im Wandel: Bioenergie und nachhaltige Landnutzung“. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex08.pdf. Berlin: WBGU.

Rosegrant, M. W., Paisner, M. S., Meijer, S. und Witcover, J. (2001): Global Food Projections to 2020. Emerging Trends and Alternative Futures. Washington, DC: International Food Policy Research Institute (IFPRI).

Röser, D., Asikainen, A., Stupak, I. und Pasanen, K. I. H. S., Dordrecht, Niederlanden. (2008): Forest energy resources and potentials. In: Röser, D., Asikainen, A., Raulund-Rasmussen, K. und Stupak, I. (Hrsg.): Sustainable Use of Forest Biomass for Energy. A Synthesis With Focus on the Baltic and Nordic Region. Berlin, Dordrecht: Springer, NN.

Roy, M. (2008): Nachwärme aus Biogasverstromung ergänzt Holzhackschnitzel-Kessel. BWK Band 60. Düsseldorf: VDI-Springer-Verlag.

RSB – Roundtable on Sustainable Biofuels (2008a): Principles and Criteria – Introduction. Internet: http://cgse.epfl.ch/page70341.html Lausanne: RSB, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

RSB – Roundtable on Sustainable Biofuels (2008b): Global Principles and Criteria for Sustainable Biofuels Production. Version Zero. Lausanne: RSB, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

Rudloff, B. (2008): Nahrungsmittelkrisen und die falsche Angst vor der Globalisierung. SWP-Aktuell 45. Berlin: Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP).

Russelle, M. P., Morey, R. V., Baker, J. M., Porter, P. M. und Jung, H.-J. G. (2007): Comment on „Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass“. Science 316, 1567b.

Sachs, J. D. (2008): Surging food prices mean global instability. Misguided policies favor biofuels over grain for hungry people. Scientific American Magazine Mai, 2.

Saffih-Hdadi, K. und Mary, B. (2008): Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. Soil Biology & Biochemistry 40, 594–607.

Salvatore, M., Pozzi, F., Ataman, E. und Bloise, M. (2005): Mapping Global Urban and Rural Population Distributions. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Sanchez Blanco, L. (2008): Key Challenges in Agro-Industrial Development in Africa, Presentation of the African Development Bank at the GAIF in New Delhi, April 2008. Internet: http://www.afdb.org/pls/portal/url/ITEM/4B1451DC39215FAEE040C00A0C3D3892 (gelesen am 07. Mai 2008). Tunis, Tunesien: African Development Bank (AfDB).

Sanderson, E. W., Jaiteh, M., Levy, M. A., Redford, K. H., Wannebo, A. V. und Woolmer, G. (2002): The Human

Footprint and the Last of the Wild. Bioscience 52 (10 (October 2002)), 891–904.

Sawyer, D. (2008): Climate change, biofuels and eco-social impacts in the Brazilian Amazon and Cerrado. Phil. Trans. R. Soc. B 363, 1747–1752.

SBGF – Swedish Biogas Association, SGC – Svenskt Gastekniskt Center AB und Gasföreningen (2008): Biogas From Manure and Waste Products – Swedish Case Studies. Stockholm: SBGF, SGC, Gasföreningen.

Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M. und Zhang, L. (2007): Global impacts of conversions fRom natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. Water Resources Research 43, W03437, doi: 03410.01029/02006WR005486.

SCBD – Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2008): The Potential Impacts of Biofuels on Biodiversity. UNEP/CBD/COP/9/26. Montreal: Secretariat of the CBD.

Schaphoff, S., Lucht, W., Gerten, D., Sitch, S., Cramer, W. und Prentice, I. C. (2006): Terrestrial biosphere carbon storage under alternative climate projections. Climatic Change 74 (1-3), 97–122.

Schinninger, I. (2008): Entwicklung der globalen Landnutzung. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Welt im Wandel: Bioenergie und nachhaltige Landnutzung". Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex09.pdf. Berlin: WBGU.

Schlamadinger, B., Faaij, A. und Daugherty, E. (2006): Should we Trade Biomass, Renewable Certificates, or CO_2 Credits. Study on Behalf of IEA Bioenergy Task 38 With Contributions of IEA Bioenergy Task 35 and Task 40. Paris: International Energy Agency (IEA).

Schlamadinger, B., Faaji, A., Junginger, M., Woess-Gallasch, S. und Daugherty, E. (2005): Options for Trading Bioenergy Products and Services. IEA Bioenergy Task 38, 40. Paris: International Energy Agency (IEA).

Schlamadinger, B., Grubb, M., Azar, C., Bauen, A. und Berndes, G. (2001): Carbon Sinks and Biomass Energy Production. A Study of Linkages, Options and Implications. Project Initiation, Coordination and Dissemination by Climate Strategies. London: UK Department for Environment, Food and Rural Affairs.

Schleich, J. und Gruber, E. (2008): Beyond case studies: Barriers to energy efficiency in commerce and the services sectors. Energy Economics 30 (2), 449–464.

Schmer, M. R., Vogel, K. P., Mitchell, R. B. und Perrin, R. K. (2008): Net energy of cellulosic ethanol from Switchgrass. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United Nations of America 105, 464–469.

Schmidhuber, J. und Shetty, P. (2005): The Nutrition Transition to 2030. Why Developing Countries are Likely to Bear the Major Burden. Plenary Paper Presented at the 97th Seminar of the European Association of Agricultural Economists. Reading: European Association of Agricultural Economists. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations of the United Nations (FAO).

Schmidt, J. E. U. (2008): Ökologische Risiken transgener Bäume unter Biodiversitätsgesichtspunkten. Gutachten im Auftrag des BfN. Bonn: Bundesamt für Naturschutz (BfN).

Schmitt, C. B., Pistorius, T. und Winkel, G. (2007): A Global Network of Forest Protected Areas under the CBD: Opportunities and Challenges. Proceedings of an international Expert Workshop held in Freiburg, Germany, May 9–11, 2007. Remagen: Kessel.

Schmitz, G. und Schütte, G. (2000): Plants Resistant Against Abiotic Stress. Hamburg: Universität Hamburg.

Schneider, L. (2007a): Crediting the Displacement of Non-Renewable Biomass Under the CDM. Submission by Öko-Institut to the Public Call by the Executive Board of the Clean Development Mechanism. Report by Öko-Institut Prepared for WWF. Freiburg: Öko-Institut.

Schneider, L. (2007b): Is the CDM Fulfilling its Environmental and Sustainable Development Objectives? An Evaluation of the CDM and Options for Improvement. Frankfurt/M.: Worldwide Fund for Nature (WWF).

Schuchhardt, F. (2007): Palmöl: Saubere Produktion eines natürlichen Energieträgers – Ein neuer Baustein zur umweltverträglichen Palmölproduktion. ForschungsReport 2. Braunschweig: Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL).

Schulze, E.-D., Freibauer, A. und Matthes, F. C. (2007): Kyoto-Protokoll: Untersuchung von Optionen für die Weiterentwicklung der Verpflichtungen für die 2. Verpflichtungsperiode, Teilvorhaben „Senken in der 2. Verpflichtungsperiode". Berlin: UBA.

Schütz, H. und Bringezu, S. (2006): Flächenkonkurrenz bei der weltweiten Bioenergieproduktion. Kurzstudie im Auftrag des Forums für Entwicklung. Bonn: Forum für Entwicklung.

Schwertmann, U., Vogl, W. und Kainz, M. (1987): Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Stuttgart: Ulmer.

Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D. und Yu, T.-H. (2008): Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land use change. Science 319, 1238–1240.

Seemüller, M. (2001): Ökologische bzw. konventionell-integrierte Landbewirtschaftung. Zeitschrift für Ernährungsökologie 2 (2), 94–96.

SEKAB – Svensk Etanolkemi AB (2008): The World's First Verified Sustainable Ethanol Comes to Sweden. SEKAB Press Release, 26. May 2008 Internet: http://www.sustainableethanolinitiative.com/Eng/Standardsidor/Filer/080526%20-%20The%20worlds%20first%2026%205.pdf (gelesen am 24. Juni 2008). Örnsköldsvik, Schweden: SEKAB.

Sell, M. (2006): Trade, climate change and the transition to a sustainable energy future. Framing the debate. In: International Centre for Trade and Sustainable Development (ICTSD) (Hrsg.): Linking Trade, Climate Change and Energy. ICTSD Trade and Sustainable Energy Series. Genf: ICTSD, 1–2.

Setyogroho, B. (2007): Mondaq Topics – Energy and Environment – Indonesia Follows Suit in the Production and Use of Biofuels. Meldung vom 12.04.2007. Internet: http://www.mondaq.com/article.asp?article_id=47580 (gelesen am 26. März 2008). London: Mondaq Environmental & Energy.

Sharman, J. C. (2008): International organizations and the implementation of new financial regulations by blacklisting. In: Joachim, J., Reinalda, B. und Verbeek, B. (Hrsg.): International Organizations and Implementation: Enforcers, Managers, Authorities? Oxford: Routledge, NN.

Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. und Kira, T. (1964): A quantitative analysis of th eplant form – the pipe model theory. Japanes Journal of Ecology 14 (3), 98–104.

Shiva, V. (2008): Stolen harvest. World Conservation (Mai), 14.

Siegel, J. (2008): Multilateral Financing for Biofuels. Präsentation im Rahmen der International Fund for Agricultural Development (IFAD), International Consultation on Pro-Poor Jatropha Development, 10-11 April 2008 Rome/Italy. Internet: http://www.ifad.org/events/jatropha/roundtable/J_Siegel.ppt (gelesen am 13. Juni 2008). Rom: International Fund for Agricultural Development (IFAD).

Silver, W. L., Kueppers, L. M., Lugo, A., Ostertag, R. und Matzek, R. (2004): Carbon sequestration and plant commu-

nity dynamics following reforestation of tropical pasture. Ecological Applications 14 (4), 1115–1127.

Sims, R. E. H., Schock, R. N., Adegbululgbe, A., Fenhann, J., Konstantinaviciute, I., Moomaw, W., Nimir, H. B., Schlamadinger, B., Torres-Martínez, J., Turner, C., Uchiyama, Y., Vuori, S. J. V., Wamukonya, N. und Zhang, X. (2007): Energy supply. In: Metz, B., Davidson, O., Bosch, P. R., Dave, R. und Meyer, L. A. (Hrsg.): Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 251–322.

Singh, S. (2005): Environmental Goods Negotiations. Issues and options for ensuring win-win outcomes. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development (IISD).

Sirisomboon, P., Kitchaiya, P., Pholpho, T. und Mahuttanyavanitch, W. (2007): Physical and mechanical properties of Jatropha curcas L. fruits, nuts and kernels. Biosystems Engineering 97, 201–207.

Sitch, S., Smith, B., Prentice, I. C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J. O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M. T., Thonicke, K. und Venevsky, S. (2003): Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. Global Change Biology 9 (2), 161–185.

Six, J., Feller, C., Denef, C., Ogle, S. M., de Moraes Sa, J. C. und Albrecht, A. (2002): Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – effects of no-tillage. Agronomie 22, 755–775.

Skysails (2008): Frachtschifffahrt & Umwelt. Berechnung von Treibstoffersparnis und Amortisationsdauer. Internet: http://www.skysails.info/index.php?id=89&L=0 (gelesen am 18. September 2008). Hamburg: Skysails.

Smeets, E., Faaij, A. P. C. und Lewandowski, I. (2004): A Quickscan of Global Bio-Energy Potentials to 2050. An Analysis of the Regional Variability of Biomass Resources for Export in Relation to the Underlying Factors. Utrecht: Secretaariat programma Duurzame Energie Nederland (DEN).

Smeets, E. M. W., Faaij, A. P. C., Lewandowski, I. M. und Turkenburg, W. C. (2007): A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. Progress in Energy and Combustion Science 33 (1), 56–106.

Smith, L. C. und Haddad, L. (2000): Explaining child malnutrition in developing countries – a cross-country analysis. Washington, DC: International Food Policy Research Institute (IFPRI).

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B. und Sirotenko, O. (2007a): Agriculture. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.): Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 497–541.

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U. und Towprayoon, S. (2007b): Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. Agriculture, Ecosystems and Environment 118 (1–4), 6–28.

Smyth, A. J. und Dumanski, J. (1993): FESLM: An International Framework for Evaluating Sustainable Land Management. World Soil Resources Report 73. Rom: Food and Agriculture Organization (FAO).

SNV – Netherlands Development Organisation (2008): Biogas and Renewable Energy Programme. Internet: http://www.snv.org.vn/ (gelesen am 27. Februar 2008). Hanoi: SNV.

Soussana, J.-F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T. und Arraouays, D. (2004): Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. Soil Use and Management 20, 219–230.

SRU – Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (2007): Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten. Berlin: SRU.

SRU – Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (2008): „Naturschutz im Umweltgesetzbuch". Offenes Schreiben des Vorsitzenden des SRU an Kanzleramtsminister de Maizière. Internet: http://www.umweltrat.de/04presse/downlo04/hintgru/Brief_UGB_Naturschutz_2008_04.pdf (gelesen am 14. Mai 2008). Berlin: SRU.

Staffhorst, M. (2006): The Way to Competitiveness of PV – An Experience Curve and Break-even Analysis. PhD-Thesis. Kassel: Kassel University Press GmbH.

Statis (2008): Ein- u. Ausfuhr (Außenhandel): Deutschland, Monate, Warengruppen (EGW 2002: 3-Steller), Steinkohle, Braunkohle. Internet: https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/ (gelesen am 20. Oktober 2008). Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Stattersfield, A. J., Crosby, M. J., Long, A. J. und Wege, D. C. (1998): Endemic bird areas of the world. Priorities for biodiversity conservation. BirdLife Conservation Series. Cambridge: BirdLife International.

Stecher, K.-H. (2007): Neue Größenordnung: Perspektiven der Biokraft in Brasilien. Internet: http://www.entwicklungspolitik.org/home/12-007-02/ (gelesen am 13. Mai 2008). eins Entwicklungspolitik online.

Steenblik, R. (2007): Biofuels – At What Cost? Government Support for Ethanol and Biodiesel in Selected OECD Countries. A Synthesis of Reports Addressing Subsidies for Biofuels in Australia, Canada, the European Union, Switzerland and the United States. Genf: The Global Subsidies Initiative (GSI).

Steger, S. (2005): Der Flächenrucksack des europäischen Außenhandels mit Agrarprodukten – Welche Globalisierung ist zukunftsfähig? Wuppertal: Wuppertal Institut.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., V., C., Rosales, M. und de Haan, C. (2006): Livestock's Long Shadow. Environmental Issues and Options. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Sterk, W. und Arens, C. (2006): Die projektbasierten Mechanismen CDM & JI. Einführung und praktische Beispiele. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Stern, N. (2006): The Economics of Climate Change. The Stern Review. London: HM Treasury.

Stern, N. (2008): Key Elements of a Global Deal on Climate Change. London: The London School of Economics and Political Science.

Sterner, M. (2007): Technical Analysis and Assessment of Biomass-to-Liquid Technologies. Unveröffentlichte Masterarbeit. Leipzig, Oldenburg: Institut für Energetik und Umwelt und Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg.

Sterner, M., Schmid, J. und Wickert, M. (2008): Effizienzgewinn durch erneuerbare Energien – der Primärenergiebeitrag von erneuerbaren Energien. BWK 60. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag.

Stiens, H. (2000): Ermittlung des gesamtheitlichen Wirkungsgrades als Kennzahl zur rationellen Energienutzung in der Produktionstechnik. Dissertation. Aachen: Technische Universität, Shaker Verlag.

Stolton, S., Maxted, N., Ford-Lloyd, B., Kell, S. und Dudley, N. (2006): Food Stores: Using Protected Areas to Secure Crop Genetic Diversity. Arguments for Protection. Gland, Birmingham: World Wide Fund for Nature (WWF), University of Birmingham.

Stolzenburg, K. (2007): Chinaschilf (Miscanthus x giganteus) – Anbau und rechtliche Rahmenbedingungen. Merkblatt. Internet: http://www.landwirtschaft-bw.info/servlet/PB/show/1199500/index.pdf (gelesen am 10. Dezember 2007). Rheinstetten: Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg. Aussenstelle Forchheim, Rheinstetten.

Stone, R. (2007): Can palm oil plantations come clean? Science 317, 1491.

Strassburg, B., Turner, K., Fisher, B., Schaeffer, R. und Lovett, A. (2008): An Empirically-Derived Mechanism of Combined Incentives to Reduce Emissions from Deforestation. Norwich, UK: The Centre for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE).

Strauß, K. (2006): Kraftwerkstechnik: zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen. Berlin, Heidelberg New York: Springer.

Sugathan, M. (2006): Climate change benefits from liberalisation of environmental goods and services. In: International Centre for Trade and Sustainable Development (ICTSD) (Hrsg.): Linking Trade, Climate Change and Energy. ICTSD Trade and Sustainable Energy Series. Genf: ICTSD, 8–9.

Sukhdev, P. (2008): The Economics of Ecosystems & Biodiversity. An Interim Report. Brüssel: European Communities.

Sulzman, J. und Ruhl, J. B. (2002): Paying to protect watershed services: wetland banking in the United States. In: Pagiola, S., Bishop., J. und Landell-Mills, N. (Hrsg.): Selling Forest Environmental Services. Market-Based Mechanisms for Conservation and Development. London: Earthscan, 77–90.

Sutherland, J. W., Bailey, M. J., Bainbridge, I. P., Brereton, T., Dick, J. T. A., Drewitt, J., Dulvy, N. K., Dusic, N. R., Freckleton, R. P., Gaston, K. J., Gilder, P. M., Green, R. E., Heathwaite, A. L., Johnson, S. M., Macdonald, D. W., Mitchell, R. B., Osborn, D., Owen, R. P., Pretty, J., Prior, S. V., Prosser, H., Pullin, A. S., Rose, P., Stott, A., Tew, T., Thomas, C. D., Thompson, D. B. A., Vickery, J. A., Walker, M., Walmsley, C., Warrington, S., Watkinson, A. R., Williams, R. J., Woodroffe, R. und Woodroof, H. J. (2008): Future novel threats and opportunities facing UK biodiversity identified by horizon scanning. Journal of Applied Ecology, doi: 10.1111/j.1365–2664.2008.01474.x.

Swamy, S. L. und Puri, S. (2005): Biomass production and C-sequestration of Gmelina arborea in plantation and agroforestry system in India. Agroforestry Systems 64, 181–195.

Swearingen, J., Reshetiloff, K., B. Slattery, B. und Zwicker, S. (2002): Plant Invaders of Mid-Atlantic Natural Areas. National Park Service and U.S. Fish & Wildlife Service. Internet: http://www.invasive.org/eastern/midatlantic/ (gelesen am 10. Dezember 2007). Tifton, GA: National Park Service and U.S. Fish & Wildlife Service.

TAB – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (2000): Risikoabschätzung und Nachzulassungs-Monitoring transgener Pflanzen. Sachstandsbericht, TA-Arbeitsbericht Nr. 68. Berlin: TAB.

TAB – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (2005): TA-Projekt Grüne Gentechnik – Transgene Pflanzen der 2. und 3. Generation. Endbericht. Berlin: TAB.

TAB – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (2007): Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. TAB-Arbeitsbericht 114. Berlin: TAB.

ten Kate, K., Bishop, J. und Bayon, R. (2004): Biodiversity Offsets. Views, Experience, and the Business Case. Gland: IUCN.

ter Heegde, W. (2005): Domestic Biogas and CDM Financing – Support Project to the Biogas Programme for the Animal Husbandry Sector in Vietnam. Internet: http://unapcaem.org/Activities%20Files/A01/The%20opportunities%20and%20challenges%20of%20the%20CDM%20for%20the%20financing%20of%20phase%20II%20of%20the%20Biogas%20Project%20in%20Vietnam.pdf (gelesen am 19. Mai 2008). Ha Noi: Netherlands Development Organization (SNV).

TERI – The Energy and Resources Institute (2008): TERI Technologies – Biomass Gasifier – Based Power Generation System. Internet: http://www.teriin.org/tech_powergeneration.php (gelesen am 16. Juli 2008). New Delhi: TERI.

TERI – The Energy and Resources Institute und GTZ – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (2005): Liquid Biofuels for Transportation: India Country Study on Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy. New Delhi: TERI.

Teufel, J. (2005): Entwicklung stresstoleranter Nutzpflanzen im Zuge des Klimawandels: Überblick über den Forschungsstand und Perspektiven. In: Korn, H., Schliep, R. und Stadler, J. (Hrsg.): Biodiversität und Klima – Vernetzung der Akteure in Deutschland – Ergebnisse und Dokumentation des Auftaktworkshops an der Internationalen Naturschutzakadmie des Bundesamtes für Naturschutz, Insel Vilm, 29.09.-01.10.2004. BfN-Skripten 131. Berlin: Bundesamt für Naturschutz (BfN), 55–56.

TFZ – Technologie- und Förderzentrum des Bayrischen Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten (2008): Rutenhirse. Standortansprüche, Anbau und Ernte. Internet: http://www.tfz.bayern.de/rohstoffpflanzen/16592/ (gelesen am 13. Oktober 2008). München: TFZ.

The Royal Society (2008): Sustainable Biofuels: Prospects and Challenges. London: The Royal Society.

Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., de Siqueira, M. F., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A. S., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega–Huerta, M. A., Townsend Peterson, A., Phillips, O. L. und Williams, S. E. (2004): Extinction risk from climate change. Nature 427 (8.1.04), 145–148.

Thonicke, K., Venevsky, S., Sitch, S. und Cramer, W. (2001): The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model. Global Ecology and Biogeography 10 (6), 661–677.

Thrän, D. M., Weber, A., Scheuermann, N., Fröhlich, J., Zeddies, A., Henze, C., Thoroe, J., Schweinle, U. R., Fritsche, W., Jenseit, L., Rausch, L. und Schmidt, K. (2005): Nachhaltige Biomassenutzungsstrategien im europäischen Kontext. Analyse im Spannungsfeld nationaler Vorgaben und der Konkurrenz zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Bioenergieträgern. Kapitel 6: Biomassemärkte. Leipzig: Institut für Energetik und Umwelt.

Thrän, D., Seiffert, M., Müller-Langer, F., Plättner, A. und Vogel, A. (2007): Möglichkeiten einer europäischen Biogaseinspeisungsstrategie. Leipzig: Institut für Energetik und Umwelt.

Thürer, D. (2000): Soft law. In: Bernhardt, R. (Hrsg.): Encyclopedia of Public International Law. Volume IV. Amsterdam: Elsevier, 452–460.

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. und Polasky, S. (2002): Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature 418 (8. August), 671–677.

Tilman, D., Hill, J. und Lehman, C. (2006): Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. Science 314 (5805), 1598–1600.

Tilman, D., Hill, J. und Lehman, C. (2007): Response on comment on „Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass“. Science 316, 1567c.

Toepfer International (2007): Statistische Informationen zum Getreide- und Futtermittelmarkt. Edition Oktober 2007. Internet: http://www.acti.de/frameset.html (gelesen am 23. Juni 2008). Hamburg: Toepfer International.

Tollefson, J. (2008): Brazil goes to war against logging. Nature 452, 134–135.

Trewavas, A. (2002): Malthus foiled again and again. Nature 418, 668–670.

TU Vienna (2005): Energiezentrale zur Umwandlung von biogenen Roh- und Reststoffen einer Region in Wärme, Strom, BioSNG und flüssige Kraftstoffe: Endbericht. Wien: Institut für Verfahrenstechnik TU Wien.

Tuck, G., Glendining, M. J., Smith, P., House, J. I. und Wattenbach, M. (2006): The potential distribution of bioenergy crops in Europe under present and future climate. Biomass and Bioenergy 30, 183–197.

TUM – TU München (2000): Raps – RME. München: Technische Universität

Turner II, B. L., Clark, W. C., Kates, R. W., Richards, J. F., Mathews, J. T. und Meyer, W. B. (1990): The Earth as Transformed by Human Action: Global and Regional Changes in the Biosphere Over the Past 300 Years. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

Turyareeba, P. und Drichi, P. (2001): Plan for the Development of Uganda's Energy Biomass Strategy. Internet: http://www.uneprisoe.org/SEAF/PlanDevelopBioEnergyStrategy.pdf (gelesen am 27. Februar 2008). Kampala, Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP).

Tylianakis, J. M., Rand, T. A., Kahmen, A., Klein, A.-M., Buchmann, N., Perner, J. und Tscharntke, P. (2008): Resource heterogeneity moderates the biodiversity-function relationship in real world ecosystems. Public Library of Science Biology 6 (e122), doi:10.1371/journal.pbio.0060122.

UBA – Umweltbundesamt (2003a): Reduzierung der Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr. Materialienband. Berlin: UBA.

UBA – Umweltbundesamt (2003b): Klimaverhandlungen – Ergebnisse aus dem Kyoto-Protokoll, den Bonn-Agreements und den Marrakesh Accords. Berlin: UBA.

UBA – Umweltbundesamt (2004): Recycling von Phosphor verbessern. Presse-Information Nr. 103/2004. Berlin: UBA.

UBA – Umweltbundesamt (2006a): Monitoring und Bewertung der Förderinstrumente für Erneuerbare Energien in EU Mitgliedsstaaten. Climate Change Nr. 8. Dessau: UBA.

UBA – Umweltbundesamt (2006b): Zertifikathandel für erneuerbare Energien statt Erneuerbare Energien-Gesetz? Hintergrundpapier zum Vorschlag des Verbands der Elektrizitätswirtschaft Dessau. Dessau: UBA.

UBA – Umweltbundesamt (2007): Umweltbundesamt – Daten- und Rechenmodell TREMOD: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960–2030, Version 4, Heidelberg 2005, im Auftrag des Umweltbundesamtes 2006 Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Dessau: UBA.

UBA – Umweltbundesamt (2008a): Bodenschutz beim Anbau nachwachsender Rohstoffe. Empfehlungen der „Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt". Dessau: UBA.

UBA – Umweltbundesamt (2008b): Wirtschaftliche Bewertung von Maßnahmen des integrierten Energie- und Klimaprogramms (IEKP): Wirtschaftlicher Nutzen des Klimaschutzes. Kostenbetrachtung ausgewählter Einzelmaßnahmen der Meseberger Beschlüsse zum Klimaschutz. Forschungsbericht 205 46 434. UBA-FB 001097. Dessau: UBA.

UC Berkeley – University of California Berkeley (2008): RAEL – Renewable and Appropriate Energy Laboratory. Understanding and Exploring the Future of our World's Energy. Internet: http://rael.berkeley.edu (gelesen am 18. August 2008). Berkeley, CA: University of California.

Ullrich, P. (2008): Kraftstoffe aus Algen: Der Tank bleibt leer. Umwelt aktuell Juni, 6–7.

Umsicht – Fraunhofer-Institut für Umwelt- Sicherheits- und Energietechnik (2007): Rechtsprobleme der Erzeugung von Biogas und der Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse aus dem Workshop „Rechtsfragen der Einspeisung von Biogas in die Gasnetze. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik Umsicht. Oberhausen: Umsicht.

UN – United Nations (2006): Cooperation Between the United Nations Environment Programme and the United Nations Development Programme: Note by the Executive Director: UNEP/GC/24/INF/19. New York: UN.

UN – United Nations (2008): High Level Task Force on the Global Food Crisis: Elements of a Comprehensive Framework for Action (Draft as of June 3rd 2008). New York: UN.

UN-Energy (2007a): UN-Energy Homepage. Internet: http://esa.un.org/un-energy/index.htm (gelesen am 26. Oktober 2007). New York: ESA.

UN-Energy (2007b): Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision Makers. New York: UN-Energy.

UNCCD – United Nations Convention to Combat Desertification (2008): An Introduction to the United Nations Convention to Combat Desertification. Fact Sheet. New York: UNCCD.

UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development (2006a): Challenges and Opportunities for Developing Countries in Producing Biofuels. Genf: UNCTAD.

UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development (2006b): The Emerging Biofuels Market Regulatory. Trade and Development Implications. Genf: UNCTAD.

UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development (2008a): The BioFuels Initiative of UNCTAD. Internet: http://r0.unctad.org/ghg/biofuels.htm (gelesen am 04. März 2008). Genf: UNCTAD.

UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development (2008b): Draft UNCTAD XII Negotiated Text. UNCTAD Twelfth Session, Accra, Ghana. 20–25 April 2008. Internet: http://www.unctad.org/Templates/Meeting.asp?intItemID=4287&lang=1 (gelesen am 13. Juni 2008). New York: UNCTAD.

UNECE – United Nations Economic Commission for Europe (2005): European Forest Sector Outlook Study, 1960–2000–2020. Main Report. Genf UNECE.

UNEP – United Nations Environment Programme (2002): Global Environment Outlook GEO-3. Past, Present and Future Perspectives. Nairobi: UNEP.

UNEP – United Nations Environment Programme (2007a): Global Environment Outlook GEO–4. Environment for Development. Nairobi: UNEP.

UNEP – United Nations Environment Programme (2007b): Empowering Rural Communities by Planting Energy. Roundtable on Bioenergy Enterprise in Developing Regions. Background Paper Internet: http://www.unep.fr/energy/act/bio/index.htm (gelesen am 16. Juni 2008). Nairobi: UNEP.

UNEP – United Nations Environment Programme (2008): UNEP Yearbook 2008. An Overview of Our Changing Environment. Nairobi: UNEP.

UNEP Risoe Centre on Energy Climate and Sustainable Development (2008): CDM/JI Pipeline Analysis and Database. Internet: http://www.cdmpipeline.org (gelesen am 04. März 2008). Roskilde: UNEP Risoe.

UNEP-WCMC – United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre (2008): World Database on Protected Areas. Cambridge, UK: UNEP-WCMC.

UNESCO-MAB – United Nations Educational Scientific and Cultural Organization Man and the Biosphere Programme (1995): Statutory Framework of the World Network of Biosphere Reserves. Paris: UNESCO-MAB.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2002): Report of the Conference of the Parties on Its Seventh Session, Held at Marrakesh From 29 October to 10 November 2001. FCCC/CP/2001/13/Add.1. New York: UNFCCC.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2003): Estimation, Reporting and Accounting of Harvested Wood Products. Technical Paper FCCC/TP/2003/7. New York: UNFCCC.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2006): CDM Executive Board 28th Meeting 12–15 December 2006. Annex 35 – Revisions to General Guidance on Leakage in Biomass Project Activities. Internet: https://cdm.unfccc.int/EB/028/eb28_repan35.pdf (gelesen am 20. Mai 2008). New York: UNFCCC.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2007a): Annual Report of the Executive Board of the Clean Development Mechanism to the Conference of the Parties Serving as the Meeting of the Parties. FCCC/KP/CMP/2007/3 (Part I+II) 6 November 2007. New York: UNFCCC.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2007b): Investment and Financial Flows to Address Climate Change. New York: UNFCCC.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2008a): CDM Home — Project 0547: Facilitating Reforestation for Guangxi Watershed Management in Pearl River Basin. Internet: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1154534875.41/view (gelesen am 04. März 2008). Genf: UNFCCC.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2008b): DM Project 529: Bunge Guará Biomass Project. Internet: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1152887084.53 (gelesen am 10. Oktober 2008). Genf: UNFCCC.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2008c): Salto Grande Farmer's Cooperative Self Consumption Biodiesel Plant. Internet: http://cdm.unfccc.int/Projects/Validation/DB W1ONENRIPBKD-J804YNXPDO86BSON75/view.html (gelesen am 10. Oktober 2008). Genf: UNFCCC.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2008d): Fuel Switch from Petro-diesel to Biofuel for the Transport Sector in Bangalore Metropolitan Transport Corporation (BMTC), Karnataka, India. Internet: http://cdm.unfccc.int/Projects/Validation/DB/U5H6LUX-R77B4DVODY5BHUUCB6E0IB7/view.html (gelesen am 10. Oktober 2008). Genf: UNFCCC.

Universität Hohenheim (2008): Bachelor Nachwachsende Rohstoffe und Bioenergie (NawaRo). Internet: https://agrar.uni-hohenheim.de/60195.html (gelesen am 07. Juni 2008). Hohenheim: Universität Hohenheim.

Universität Michigan (2008): ConsEnSus – Concentration in Environmental Sustainability. Programmbeschreibung. Internet: http://www.engin.umich.edu/prog/consensus/ (gelesen am 18. August 2008). Michigan: Universität Michigan.

UNPD – United Nations Population Division of the Department of Economic and Social Affairs (2006): World Population Prospects: The 2006 Revision. Internet: http://esa.un.org/unpp (gelesen am 16. Mai 2008). New York: Department of Economic and Social Affairs (UN DESA).

Uryu, Y., Mott, C., Foead, N., Yulianto, K., Budiman, A., Setiabudi, Takakai, F., Nursamsu, Sunarto, Purastuti, E., Fadhli, N., Hutajulu, C. M. B., Jaenicke, J., Hatano, R., Siegert, F. und Stüwe, M. (2008): Deforestation, Forest Degradation, Biodiversity Loss and CO_2 Emissions in Riau, Sumatra, Indonesia. Jakarta: WWF Indonesia.

USDA – U.S. Department of Agriculture (2001): Switchgrass, Panicum virgatum L. Plant Fact Sheet. Washington, DC: USDA.

USDA – U.S. Department of Agriculture (2008): Secretary Ed Schafer Pre-Trip Media Availability for United Nations Food and Agriculture Organization June 3 Conference on World Food Security. Release No. 0140.08. Washington, DC: USDA.

Valencia, A. und Caspary, G. (2008): Hürden der ländlichen Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. DIE Analysen und Stellungsnahmen. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE).

van Burgel, M. (2006): Biogas and Others in Natural Gas Operations (BINGO). A Project Under Development. 23rd World Gas Conference Amsterdam. Groningen: Nederlandse Gasunie.

van Dam, D., Veldkamp, E. und van Breemen, N. (1997): Soil organic carbon dynamics: variability with depth in forested and deforested soils under pasture in Cosa Rica. Biogeochemistry 39, 343–375.

van Dam, J., Junginger, M., Faaij, A., Jürgens, I., Best, G. und Fritsche, U. (2006): Overview of Recent Developments in Sustainable Biomass Certification. Paper Written Within the Frame of IEA Bioenergy Task 40, 22. December 2006. Preliminary Version. Utrecht: Copernicus Institute for Sustainable Development, Utrecht Universität.

van Eijck, J. und Romijn, H. (2008): Prospects for Jatropha biofuels in Tanzania. An analysis with strategic niche management. Energy Policy 36, 311–325.

van Kooten, G. C., Eagle, A. J., Manley, J. und Smolak, T. (2004): How costly are carbon offsets? A meta-analysis of carbon forest sink. Environmental Science & Policy 7, 239–251.

Vavilov, N. I. (1926): Geographical regularities in the distribution of the genes of cultivated plants. Bulletin of Applied Botany 17 (3), 411–428.

VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2000): VDI Richtlinie 3986: Ermittlung des Wirkungsgrades von konventionellen Kraftwerken Düsseldorf. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag GmbH.

VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2003): VDI Richtlinie 4661: Energiekerngrößen – Definitionen, Begriffe, Methodik. Berlin: Beuth Verlag.

VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2008): VDI 4650 Blatt 1 – Berechnung von Wärmepumpen – Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen – Elektro-Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung. Berlin: Beuth Verlag.

Venetoulis, J. und Talberth, J. (2008): Refining the ecological footprint. Environment Development and Sustainability 10, 441–469.

Verburg, P. H., Schot, P. P., Dijst, M. J. und Veldkamp, A. (2004): Land use change modelling: current practice and research priorities. GeoJournal 61 (4), 309–324.

Vermeulen, S., Dufey, A. und Vorley, B. (2008): Biofuels: Making Tough Choices. IIED Sustainable Development Opinion. London: Inernational Institute for Environment and Development (IIED).

Vieira, S., Trumbore, S., Camargo, P. B., Selhorst, D., Chambers, J. Q., Higuchi, N. und Martinelli, L. A. (2005): Slow growth rates of Amazonian trees: consequences for carbon cycling. Proceedings of the National Academy of Sciences of America 102, 18502–18507.

Vogel, A. (2006): Synthetische Biokraftstoffe: Eine Analyse vorhandener Konzepte: Innovationsforum „Stoffumwandlung in Gase im Bereich der Energieverfahrenstechnik". Leipzig: Institut für Energetik und Umwelt (IE).

Vogel, A. (2007): Dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen: Eine technische und ökonomische Bewertung der Vergasung im Vergleich zur Verbrennung. Dissertation. Hamburg-Harburg, Leipzig: Technische Universität Hamburg-Harburg.

Vogt, R., Gärtner, S., Münch, J., Reinhardt, G. und Köppen, S. (2008): Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Heidelberg, Leipzig, Berlin: Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Institut für Energetik und Umwelt (IE), Institut für angewandte Ökologie e.V., Büro Darmstadt, Technische Universität Berlin, Fachhochschule für Wirtschaft Berlin.

Voldoire, A., Eickhout, B., Schaeffer, M., Royer, J.-F. und Chauvin, F. (2007): Climate simulation of the twenty-first century with interactive land-use changes. Climate Dynamics, DOI 10.1007/s00382–00007–00228–y.

von Braun, J. (2007): When Food Makes Fuel. Promises and Challenges of Biofuels for Developing Countries and for Food Security of the Poor. Draft Version. Crawford Fund Conference „Biofuels, Energy and Agriculture – Powering Towards World Food Security?" Canberra, 15 August 2007. Canberra: Konferenz-Sekretariat.

von Braun, J., Ahmed, A., Asenso-Okyere, K., Fan, S., Gulati, A., Hoddinott, J., Pandya-Lorch, R., Rosegrant, M. W., Ruel, M., Torero, M., van Rheenen, T. und von Grebmer, K. (2008): High Food Prices. The What, Who, and How of Proposed Policy Actions. Policy Brief. Washington, DC: International Food Policy Research Institute (IFPRI).

von Drachenfels, C. (2007): Kurzanalyse und Vergleich ausgewählter Indikatoren zur Einstufung des Investitionsklimas und der Wettbewerbsfähigkeit von Volkswirtschaften, Stellungnahme für das BMZ. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE).

von Koerber, K., Kretschmer, J. und Prinz, S. (2008): Globale Ernährungsgewohnheiten und -trends. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Welt im Wandel: Bioenergie und nachhaltige Landnutzung". Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex10.pdf. Berlin: WBGU.

Wagner, H.-J., Koch, M.-K. und Burkhardt, J. (2008): CO_2-Emissionen der Stromerzeugung. BWK-Energiefachmagazin 10/2007. Düsseldorf: VDI-Springer Verlag.

Wagner, W., Scipal, K., Pathe, C., Gerten, D., Lucht, W. und Rudolf, B. (2003): Evaluation of the agreement between the first global remotely sensed soil moisture data with model and precipitation data. Journal of Geophysical Research-Atmospheres 108 (D19), 4611.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (1994): Welt im Wandel: Die Gefährdung der Böden. Bonn: Economica.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (1995): Szenario zur Ableitung globaler CO_2-Reduktionsziele und Umsetzungsstrategien. Stellungnahme zur ersten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Berlin. Sondergutachten 1995. Berlin: WBGU.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (1998): Die Anrechnung biologischer Quellen und Senken im Kyoto-Protokoll: Fortschritt oder Rückschlag für den globalen Umweltschutz? Sondergutachten 1998. Bremerhaven: WBGU.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (1999): Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Heidelberg, Berlin, New York: Springer.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2000): Welt im Wandel: Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Biosphäre. Hauptgutachten 1999. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2001a): Welt im Wandel: Neue Strukturen globaler Umweltpolitik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2001b): Die Chance von Johannesburg – Eckpunkte einer Verhandlungsstrategie. Politikpapier 1 zum Weltgipfel für Nachhaltige Entwicklung (WSSD) in Johannesburg. Berlin: WBGU.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2002): Entgelte für die Nutzung globaler Gemeinschaftsgüter. Sondergutachten 2002. Berlin: WBGU.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2003a): Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit. Hauptgutachten 2003. Berlin: Springer.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2003b): Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert. Sondergutachten 2003. Berlin: WBGU.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2004a): Welt im Wandel: Armutsbekämpfung durch Umweltpolitik. Hauptgutachten 2004. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2004b): Erneuerbare Energien für eine nachhaltige Entwicklung: Impulse für die renewables 2004. Politikpapier 3 zur Internationalen Konferenz für erneuerbare Energien „Renewables 2004". Berlin: WBGU.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2006): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten 2006. Berlin: WBGU.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2007): Neue Impulse für die Klimapolitik: Chancen der deutschen Doppelpräsidentschaft nutzen. Politikpapier 5. Berlin: WBGU.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2008): Welt im Wandel: Sicherheitsrisiko Klimawandel. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

WDPA – World Database on Protected Areas (2008): World Database on Protected Areas. Internet: http://www.wdpa.org (gelesen am 12. August 2008). Cambridge, UK: UNEP-WCMC.

WEHAB Working Group (2002): A Framework for Action on Biodiversity and Ecosystem Management. WEHAB.

Weigelt, A., Schumacher, J., Roscher, C. und Schmid, B. (2008): Does biodiversity increase spatial stability in plant community biomass? Ecology Letters 11, 338-347.

Weltsichten (2008): „Im Müll liegen die Rohstoffe der Zukunft". Abfallmanagement in Entwicklungsländern muss den informellen Sektor einbinden. Gespräch mit Günter Wehenpohl. . Bonn: Magazin für Globle Entwicklung und Ökumenische Zusammenarbeit.

Weyerhaeuser, H., Tennigkeit, T., Yufang, S. und Kahrl, F. (2007): Biofuels in China: An Analysis of the Opportunities and Challenges of Yatropha Curcas in Southwest China. ICRAF Working Paper No. 53. Nairobi, Peking: International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF) China.

White House (2006): The National Security Strategy of the United States of America. Washington, DC: The White House.

White, R. P., Murray, S. und Rohweider, M. (2000): Grassland Ecosystems. Pilot Analysis of Global Ecosystems. Washington, DC: World Ressources Institute (WRI).

WHO – World Health Organisation (2006): Fuel for Life. Household Energy and Health. Genf: WHO.

WI – Worldwatch Institute (2007): Biofuels for Transport. Global Potential and Implications for Sustainable Energy and Agriculture. London: Earthscan.

WI-IFEU – Wuppertal-Institut für Klima Umwelt und Energie – Institut für Energie- und Umweltforschung (2007): Elektromobilität und erneuerbare Energie. Arbeitspapier Nr. 5 im Rahmen des Projektes „Energiebalance – Optimale Systemlösungen für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz". Wuppertal, Heidelberg: WI und IFEU.

Wiegmann, K., Heintzmann, A., Peters, W., Scheuermann, A., Seidenberger, T. und Thoss, C. (2007): Bioenergie und Naturschutz: Sind Synergien durch die Energienutzung von Landschaftspflegeresten möglich? Endbericht and BMU. Darmstadt: Öko-Institut e.V., Institut für Energetik GmbH.

Wiesenhütter, J. (2003): Nutzung von Purgiernuss (Jatropha curcas L.) zur Desertifikationsbekämpfung und Armutsminderung. Möglichkeiten und Grenzen technischer Lösungen in einem bestimmten sozio-ökonomischen Umfeld am Beispiel Kap Verde. Konventionsprojekt Desertifikationsbekämpfung (CCD Projekt). Internet: Eschborn, Bonn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

Wiggins, S. und Levy, S. (2008): Rising Food Prices: A Global Crisis. ODI Briefing Paper 37. London: Overseas Development Institute (ODI).

Willstedt, H. und Bürger, V. (2006): Overview of Existing Green Power Labelling Schemes. A Report Prepared as Part of the EIE Project „Clean Energy Network for Europe (CLEAN-E)". Brüssel: Europäische Kommission.

Windfuhr, M. (2008): Viele Initiativen, wenig Koordination. Die Welternährungskrise legt Defizite der internationalen Steuerung im Ernährungsbereich offen. Welt-Sichten 8, 36–38.

Wirsenius, S. (2000): Human Use of Land and Organic Materials. Doktorarbeit. Göteborg: Chalmers University of Technology und Göteborg University.

Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMELV (2007): Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik. Bonn: BMVEL.

Wolf, J., Bindraban, P. S., Luijten, J. C. und Vleeshouwers, L. M. (2003): Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bioenergy. Agricultural Systems 76 (3), 841–861.

World Bank (2002): Project Appraisal Document on a proposed Grant from the Global Environment Facility Trust Fund in the Amount of SDR (USD 30 million equivalent) to the Fundo Brasileiro Para a Biodiversidad (FUNBIO) for an Amazon Region Protected Areas Project. Report No: 23756. Washington, DC: World Bank.

World Bank (2003): World Development Indicators. Washington, DC: The World Bank.

World Bank (2004): World Development Report 2004. Making Services Work for People. Washington, DC: World Bank.

World Bank (2006a): BioCarbon Fund. Internet: http://carbonfinance.org/Router.cfm?Page=BioCF&FID=9708&ItemID=9708&ft=DocLib&CatalogID=6072 (gelesen am 06. Juni 2007). Washington, DC: World Bank.

World Bank (2006b): Carbon Finance for Sustainable Development – CFU Annual Report 2006. Internet: http://carbonfinance.org/Router.cfm?Page=DocLib&CatalogID=30716 (gelesen am 06. Juni 2007). Washington, DC: World Bank.

World Bank (2006c): Strengthening Forest Law Enforcement and Governance. Addressing a Systemic Constraint to Sustainable Development. Washington, DC: World Bank.

World Bank (2007): Brazil at a Glance. Washington, DC: World Bank.

World Bank (2008a): Mali: World Bank Approves Additional Funding for Energy Services Delivery in Rural Areas. News Release No: 2009/071/AFR. Internet: http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/NEWS/0,,contentMDK:21890422~pagePK:64257043~piPK:437376~theSitePK:4607,00.html (gelesen am 15. September 2008). Washington, DC: World Bank.

World Bank (2008b): Household Energy and Universal Access Project. Internet: http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/NEWS/0,,contentMDK:21890422~pagePK:64257043~piPK:437376~theSitePK:4607,00.html (gelesen am 16. September 2008). Washington, DC: World Bank.

World Bank (2008c): World Development Report 2008. Agriculture for Development. Washington, DC: World Bank.

World Bank (2008d): Rising Food Prices Threaten Poverty Reduction. Press Release No:2008/264/PREM. Washington, DC: World Bank.

World Bank (2008e): Biofuels. Internet: http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/COUNTRIES/LACEXT/EXTLACREGTOPENERGY/0,,contentMDK:20981118~menuPK:2717951~pagePK:34004173~piPK:34003707~theSitePK:841431,00.html (gelesen am 25. Oktober 2007). Washington, DC: World Bank.

World Bank (2008f): Uganda Data Profile. Internet: http://devdata.worldbank.org/external/CPProfile.asp?CCODE=UGA&PTYPE=CP. (gelesen am 11. August 2008). Washington, DC: World Bank.

Worldwatch Institute (1999): PaperCuts: Recovering the Paper Landscape. World Watch Paper 149. Washington, DC: Worldwatch Institute.

Worldwatch Institute (2006): Biofuels for Transport. Global Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century. Summary. Berlin: GTZ, BMELV.

Worldwatch Institute (2007): Biofuels for Transport. Global Potential and Implications for Sustainable Energy and Agriculture. London: Earthscan.

Worldwatch Institute (2008): Carbon Markets Gain Momentum. Despite Challenges. Internet: http://www.worldwatch.org/node/5597 (gelesen am 01. April 2008). Washington, DC: Worldwatch Institute.

WRI – World Resources Institute (2007): EarthTrends: Environmental Information. Internet: http://earthtrends.wri.org (gelesen am 24. Juli 2008). Washington, DC: WRI.

WRI – World Resources Institute (2008): CAIT – Climate Analysis Indicators Tool. Internet: http://cait.wri.org/ (gelesen am 13. August 2008). Washington, DC: WRI.

WSSD – World Summit on Sustainable Development (2002): Plan of Implementation. Johannesburg: WSSD.

Wuebbles, D. J. und Hayhoe, K. (2002): Atmospheric methane and global change. Earth-Science Revues 57, 177–210.

Wunder, S. (2005): Payments for Environmental Services: Some Nuts and Bolts. CIFOR Occassional Paper No. 42. Bogor, Indonesien: Center for International Forestry Research (CIFOR).

Wuppertal Institut und RWI – Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (2008): Nutzungskonkurrenzen bei Biomasse. Wuppertal, Essen: Wuppertal Institut und RWI.

WWF – World Wide Fund und IUCN – The World Conservation Union (1994): Centres of Plant Diversity: A Guide and Strategy for their Conservation. IUCN.

WWF – World Wide Fund for Nature (2005a): Sugar and the Environment. Encouraging Better Management Practices in

Sugar Production. Manuskript. Internet: http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf-alt/landwirtscgaft/WWF_Action_for_Sustainable_Sugar_05.pdf (gelesen am 27. Februar 2008). Frankfurt/M.: WWF.

WWF – World Wide Fund for Nature (2005b): WWF Action for Sustainable Sugar – Making it Sweeter for Nature. WWF Global Freshwater Programme. Internet: http://assets.panda.org/downloads/sustainablesugar.pdf (gelesen am 27. Februar 2008). Frankfurt/M.: WWF.

WWF – World Wide Fund for Nature (2007): Regenwald für Biodiesel? Ökologische Auswirkungen der energetischen Nutzung von Palmöl. Frankfurt/M.: WWF.

Yimer, F., Ledin, S. und Abdelkadir, A. (2007): Changes in soil organic carbon and total nitrogen contents in three adjacent land use types in the Bale Mountains, south-eastern highlands of Ethiopia. Forest Ecology and Management 242, 337–342.

Yu, V. P. (2007): WTO Negotiating Strategy on Environmental Goods and Services for Asian Developing Countries. International Centre for Trade and Sustainable Development (ICTSD) Trade and Environment Series. Genf: ICTSD.

Zabarenko, D. (2008): World Bank's „Green" Energy Funding up 87 Percent. Pressemeldung Reuters. Internet: http://www.reuters.com/article/GCA-GreenBusiness/idUSTRE49186B20081002 (gelesen am 03. Oktober 2008). Washington, DC: Reuters.

Zah, R., Böni, H., Gausch, M., Hischier, R., Lehmann, M. und Wäger, P. (2007): Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. St. Gallen: EMPA.

Zarrilli, S. (2006): The Emerging Biofuels Market: Regulatory, Trade and Development Implications. Genf: UNCTAD.