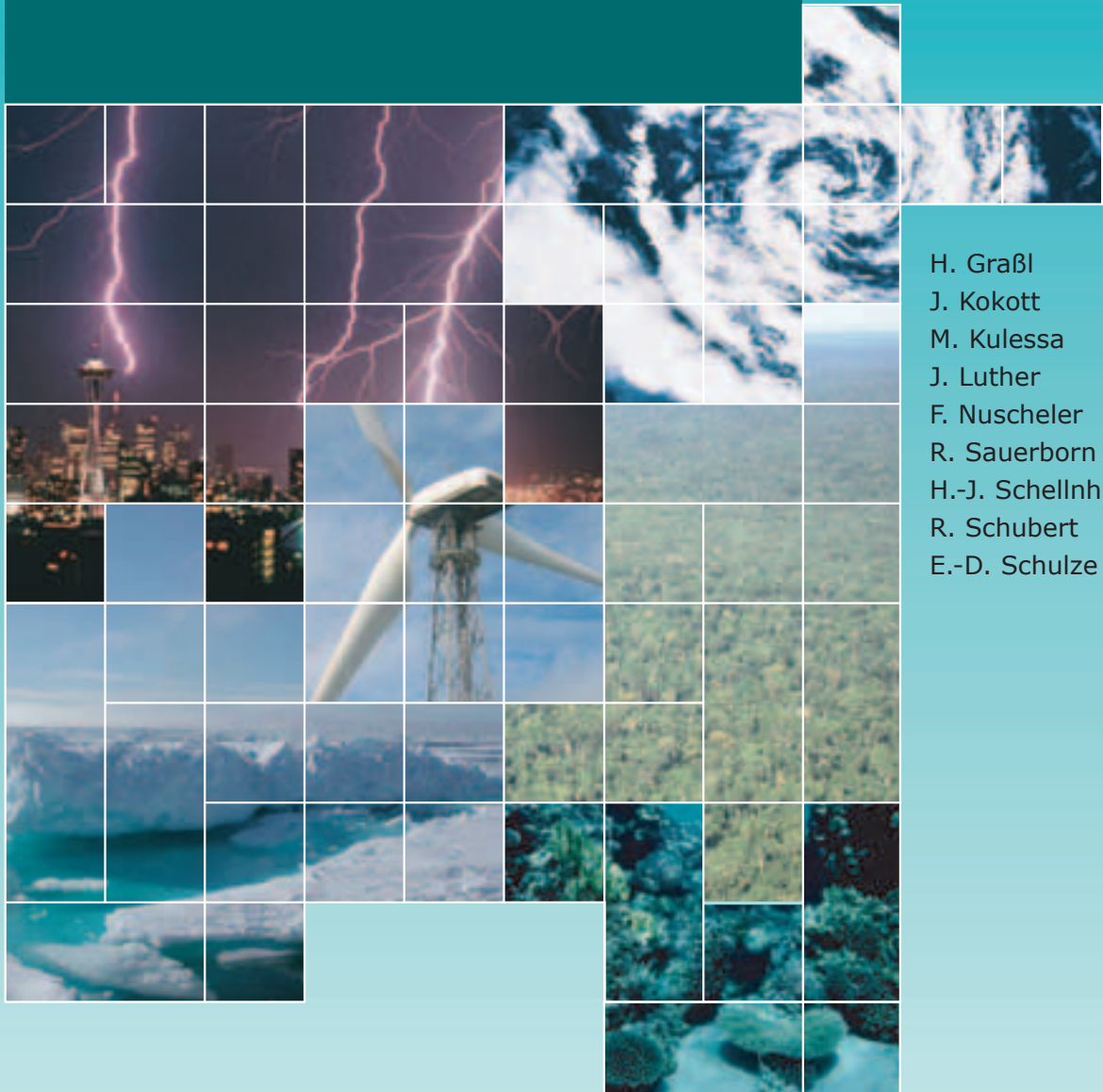




Über Kyoto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert

Sondergutachten



H. Graßl
J. Kokott
M. Kulesa
J. Luther
F. Nuscheler
R. Sauerborn
H.-J. Schellhuber
R. Schubert
E.-D. Schulze

Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen

(Stand: 10. November 2003)

Prof. Dr. Hartmut Graßl, Physiker (Vorsitzender)

Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg

Prof. Dr. Renate Schubert, Ökonomin (stellv. Vorsitzende)

Direktorin des Instituts für Wirtschaftsforschung der ETH Zürich, Schweiz

Prof. Dr. Dr. Juliane Kokott, Juristin (bis 05.10.2003)

Direktorin am Institut für Europäisches und Internationales Wirtschaftsrecht in St. Gallen, Schweiz

Prof. Dr. Margareta Kulesa, Ökonomin

Professorin für Allgemeine Volkswirtschaftslehre und Europäische Wirtschaftspolitik an der Fachhochschule Mainz

Prof. Dr. Joachim Luther, Physiker

Leiter des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme in Freiburg/Br.

Prof. Dr. Franz Nuscheler, Politologe

Direktor des Instituts für Entwicklung und Frieden in Duisburg

Prof. Dr. Dr. Rainer Sauerborn, Mediziner

Ärztlicher Direktor der Abteilung Tropenhygiene und Öffentliches Gesundheitswesen am Universitätsklinikum Heidelberg

Prof. Dr. Hans-Joachim Schellnhuber, Physiker

Direktor des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Direktor des britischen Wissenschaftsnetzwerks zum Klimawandel (Tyndall Centre) in Norwich

Prof. Dr. Ernst-Detlef Schulze, Botaniker

Direktor am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena



**Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen**

Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert

Sondergutachten

Berlin 2003

ISBN 3-936191-03-4

Titelbilder:

Blitze, Wolkenwirbel, Urwald (Pure Vision Photo Disc Deutschland), Korallenriff (Wunsch Media, Bremen), Eisberg (Archiv AWI), Windrad (Dr. C. Loose, WBGU)

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG
GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (WBGU)

Geschäftsstelle
Reichpietschufer 60–62, 8. OG
10785 Berlin

| | |
|----------|---|
| Telefon | (030) 263948 0 |
| Fax | (030) 263948 50 |
| E-Mail | wbgu@wbgu.de |
| Internet | http://www.wbgu.de |

Redaktionsschluss 10. November 2003

Dieses Sondergutachten ist im Internet unter http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003.html abrufbar.

© 2003, WBGU

Danksagung

Die Erstellung dieses Sondergutachtens wäre ohne die engagierte und unermüdliche Arbeit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Geschäftsstelle und der Beiratsmitglieder nicht möglich gewesen. Zum wissenschaftlichen Stab gehörten während der Arbeiten an diesem Gutachten:

Prof. Dr. Meinhard Schulz-Baldes (Generalsekretär), Dr. Carsten Loose (Stellvertretender Generalsekretär, Geschäftsstelle Berlin), Dr. Carsten Agert (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg), Anayo Fidelis Akunne, BA MPH (Abteilung für Tropenhygiene der Universität Heidelberg, ab 01.05.2003), Dietrich Brockhagen, DEA ök. (Geschäftsstelle Berlin, bis 31.07.2003), Dr. Ursula Fuentes Hutfilter (Geschäftsstelle Berlin, bis 31.10.2003), Dr. Thomas Fues (Institut für Entwicklung und Frieden, Duisburg), Dipl.-Umweltwiss. Tim Hasler (Geschäftsstelle Berlin), Dipl.-Pol. Lena Kempmann (Geschäftsstelle Berlin), Dr. Jacques Léonardi (Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg), Referendar-jur. Christian Lutze (MPI für deutsches und ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, Heidelberg, bis 05.10.2003), Dr. Franziska Matthies (Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich, UK), Dr. Nina V. Michaelis (Geschäftsstelle Berlin, ab 01.07.2003), Dipl.-Volksw. Kristina Nienhaus (ETH Zürich/Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart), Dr. Benno Pilardeaux (Geschäftsstelle Berlin), Dipl.-Volksw. Marc Ringel (Universität Mainz) und Dipl.-Biol. Angelika Thuille (Max-Planck-Institut für Biochemie, Jena).

Des Weiteren dankt der Beirat den externen Gutachtern für die Zuarbeit und wertvolle Hilfe. Im Einzelnen flossen folgende Expertisen in das Sondergutachten ein:

Bill Hare (Visiting Scientist): Assessment of Knowledge on Impacts of Climate Change – Contribution to the Specification of Art. 2 of the UNFCCC. Potsdam: PIK.

Dr. Axel Michaelowa, Sonja Butzengeiger, Martina Jung und Michael Dutschke: Beyond 2012 – Evolution of the Kyoto Protocol Regime. Hamburg: HWWA.

Prof. Nebojsa Nakicenovic und Dr. Keywan Riahi: Model Runs With MESSAGE in the Context of the Further Development of the Kyoto-Protocol sowie Scenario Data for Model Runs with MESSAGE. Laxenburg, Österreich: IIASA.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung V

Inhaltsverzeichnis VI

Tabellen VIII

Abbildungen IX

Zusammenfassung für Entscheidungsträger 1

1 Einleitung 7

2 Gefährlichen Klimawandel vermeiden 9

- 2.1 Was ist gefährlicher Klimawandel? 9
 - 2.1.1 Das Konzept des Klimafensters 9
 - 2.1.2 Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme 11
 - 2.1.3 Auswirkungen des Klimawandels auf Nahrungsmittelproduktion und Wasserverfügbarkeit 14
 - 2.1.4 Auswirkungen des Klimawandels auf die wirtschaftliche Entwicklung 17
 - 2.1.5 Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit 18
 - 2.1.6 Durch den Klimawandel angestoßene großräumige singuläre Ereignisse 20
 - 2.1.7 Fazit: Die WBGU-Klimaleitplanke der globalen Mitteltemperatur 22
 - 2.1.8 Forschungsempfehlungen 23
- 2.2 Von der Klimaleitplanke zu Emissionspfaden 23
 - 2.2.1 Von Temperaturleitplanken zu CO₂-Stabilisierungszielen 23
 - 2.2.2 Von Stabilisierungszielen zu Zeitpfaden von Emissionen 25
 - 2.2.3 Fazit 26
- 2.3 Ansätze zur Einhaltung vorgegebener Emissionsprofile 26
 - 2.3.1 Grundsätze zur Verteilung von Emissionsrechten 26
 - 2.3.2 Verringerung und Konvergenz 27
 - 2.3.3 Drei-Sektoren-Ansatz („Triptych“) 27
 - 2.3.4 Multisektoren-Konvergenz 27
 - 2.3.5 Brasilianischer Vorschlag 28
 - 2.3.6 Mehrstufen-Ansatz 28
 - 2.3.7 Fazit 28

3 Stabilisierungsszenarios 31

- 3.1 Klimapolitik und nachhaltige Energiesysteme 31
 - 3.1.1 Leitplanken nachhaltiger Energiepolitik 31
 - 3.1.2 Globale Klimaschutzszenarios 31
- 3.2 Analyse: Verringerung und Konvergenz in ausgewählten Szenarios 41
 - 3.2.1 Regionale Zuteilung der Emissionsrechte 42
 - 3.2.2 Voraussichtlicher Emissionshandel 45
 - 3.2.3 Voraussichtliche wirtschaftliche Auswirkungen 48

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3 | Fazit | 50 |
| 4 | Kohlenstoffsenken | 53 |
| 4.1 | Die globale Kohlenstoffbilanz | 53 |
| 4.2 | Das terrestrische Gleichgewicht der Kohlenstoffflüsse | 55 |
| 4.3 | Regionale Abschätzungen der Kohlenstoffbilanz | 58 |
| 4.4 | Verifikation | 59 |
| 4.5 | Bewertung des gegenwärtigen Kioto-Protokolls im Hinblick auf Kohlenstoffsenken | 59 |
| 4.5.1 | Historische Probleme des Kioto-Protokolls | 59 |
| 4.5.2 | Mit der Bestimmung von Senken verbundene Probleme | 62 |
| 4.6 | Bewertung der Bonn-Vereinbarung und Überlegungen für zukünftige Verpflichtungsperioden | 63 |
| 5 | Konkrete Ausgestaltung des künftigen Klimaschutzregimes | 65 |
| 5.1 | Volle Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen und -vorräten (full carbon accounting) | 65 |
| 5.2 | Das Regime der „Verringerung und Konvergenz“ für Treibhausgasemissionen | 65 |
| 5.3 | Verbesserung der Treibhausgasinventare | 66 |
| 5.4 | Weiterentwicklung der flexiblen Mechanismen | 67 |
| 5.4.1 | Clean Development Mechanism | 67 |
| 5.4.2 | Gemeiname Umsetzung (Joint Implementation) | 69 |
| 5.4.3 | Emissionshandel | 69 |
| 5.5 | Zusätzliches Protokoll zur Erhaltung der Kohlenstoffvorräte | 71 |
| 5.6 | Anreiz- und Sanktionsmechanismen | 73 |
| 5.6.1 | Bestehende Sanktionsmechanismen | 73 |
| 5.6.2 | Optionen einer künftigen Weiterentwicklung | 73 |
| 5.7 | Finanzierungsinstrumente | 74 |
| 5.8 | Instrumente globaler Energiepolitik | 75 |
| 6 | Empfehlungen | 77 |
| 6.1 | Abwehr gefährlicher Auswirkungen des Klimawandels dringend erforderlich | 77 |
| 6.2 | Verpflichtungen gerecht gestalten | 78 |
| 6.3 | Instrumente überprüfen und verbessern | 79 |
| 6.4 | Klimaanpassung gerecht finanzieren | 80 |
| 6.5 | Klimaschutz mit globaler Strukturpolitik kohärent verzahnen | 80 |
| 7 | Literatur | 83 |

Tabellen

| | | |
|------------|---|----|
| Tab. 2.1-1 | Globale Erwärmung und ihre Wirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion in Industrie- und Entwicklungsländern | 15 |
| Tab. 2.1-2 | Klimawirkungen auf Wasserressourcen | 16 |
| Tab. 3.1-1 | Überblick über ausgewählte SRES-Storylines | 32 |
| Tab. 4.1-1 | Die globale Kohlenstoffbilanz für den Zeitraum von 1990 bis 2000 | 54 |

Abbildungen

| | | |
|-------------|--|----|
| Abb. 2.1-1 | Visualisierung klimabedingter Wirkungen auf einige Ökosysteme | 12 |
| Abb. 2.1-2 | Geschätzte Einwirkung des Klimawandels auf die Gesundheit | 19 |
| Abb. 3.1-1 | Namensbildung der Szenarios | 33 |
| Abb. 3.1-2 | Primärenergieeinsatz nach Energieträgern in den IIASA-WBGU-Szenarios | 34 |
| Abb. 3.1-3 | Anteile der Energieträger am globalen Primärenergieverbrauch als zeitliche Trajektorie in einem Dreieck zwischen den Eckpunkten Kohle, Öl und Gas sowie erneuerbare Energien und Kernenergie | 35 |
| Abb. 3.1-4 | Unterschiede in den Emissionen zwischen den Referenzszenarios und den CO ₂ -stabilisierenden Szenarios | 37 |
| Abb. 3.1-5 | CO ₂ -Emissionen aus Landnutzungsänderung sowie anthropogene Methanemissionen aus allen Quellen | 38 |
| Abb. 3.1-6 | Temperaturänderung relativ zum vorindustriellen Mittelwert sowie Meeresspiegelanstieg relativ zum Jahr 2000 | 39 |
| Abb. 3.1-7 | Relative Verluste des globalen Bruttoinlandsproduktes (BIP) durch Klimaschutzmaßnahmen | 40 |
| Abb. 3.2-1 | Von IIASA in den Szenarios verwendete Aufteilung der Welt in Regionen | 41 |
| Abb. 3.2-2 | Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionsrechte bei Verringerung und Konvergenz mit dem Zieljahr 2050 und 2100 | 42 |
| Abb. 3.2-3 | Kumulierte Emissionsrechte bis 2100 und durchschnittliche jährliche Pro-Kopf-Emissionsrechte bis 2100 | 43 |
| Abb. 3.2-4 | Überblick über die Entwicklung der Emissionsrechte für ausgewählte Regionen und alle Szenarios für beide Konvergenzjahre 2050 und 2100 | 44 |
| Abb. 3.2-5 | Bis 2100 kumulierter Emissionshandel in den Stabilisierungsszenarios | 45 |
| Abb. 3.2-6 | Kumulierte energiesystembedingte und industrielle CO ₂ -Emissionen | 46 |
| Abb. 3.2-7 | Vergleich der Emissionen beim Ansatz Verringerung und Konvergenz mit dem Zieljahr 2050 für die Regionen planwirtschaftlich organisiertes Asien und Südasien inkl. Indien | 47 |
| Abb. 3.2-8 | Die Entwicklung des Preises für Emissionszertifikate für die drei Stabilisierungsszenarios mit dem Ansatz Verringerung und Konvergenz mit den Zieljahren 2050 bzw. 2100 | 48 |
| Abb. 3.2-9 | Kumulierte Erträge aus dem Emissionshandel für die vier Makroregionen | 48 |
| Abb. 3.2-10 | Auswirkungen der Stabilisierung auf das Bruttoinlandsprodukt (BIP) in den Jahren 2020, 2050 und 2100 für die elf Weltregionen | 49 |
| Abb. 4.1-1 | Emissionen aus fossilen Brennstoffen und der Anstieg der CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre sowie Anteil der Emissionen aus fossilen Brennstoffen, die zwischen 1960 und 2002 als Anstieg der CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre gemessen werden | 54 |
| Abb. 4.1-2 | Die Kohlenstoffflüsse im Ökosystem sowie Definitionen, die zur Beschreibung der Flüsse der Komponenten verwendet werden | 55 |
| Abb. 4.1-3 | Vergleich von Nettoprimärproduktivität und Nettobiomproduktivität in Sibirien, Europa und Amazonien | 56 |
| Abb. 4.2-1 | Der globale Kohlenstoffkreislauf | 57 |

- Abb. 4.2-2 Kohlenstoffvorräte im oberen Mineralboden unter derzeitigen Waldbeständen bei unterschiedlicher Vornutzung in der Vergangenheit 58
- Abb. 4.3-1 Kohlenstoffbilanz der terrestrischen Biosphäre bezogen auf die Landfläche für verschiedene europäische Länder 60

Zusammenfassung für Entscheidungsträger

Der globale Klimawandel ist eine Bedrohung, deren erste negative Auswirkungen auf Mensch und Natur bereits heute zu spüren sind. Aufgrund der Trägheit des Klimasystems wird sich diese Entwicklung nicht mehr gänzlich verhindern lassen. Noch können allerdings durch Zusammenarbeit der Staatengemeinschaft und durch nationale Anstrengungen die CO₂-Konzentration stabilisiert und so die schwerwiegendsten Klimawirkungen verhindert werden. Daher wird die Ausgestaltung des internationalen Klimaregimes eine drängende Aufgabe für die Politik der nächsten Jahrzehnte bleiben. Der WBGU gibt mit diesem Sondergutachten Empfehlungen für künftige Verhandlungen im Rahmen der Klimarahmenkonvention (UNFCCC), insbesondere des Kioto-Protokolls. Drei Fragen stehen dabei im Mittelpunkt:

- Was ist eine „gefährliche Klimaänderung“ im Sinne des Artikels 2 UNFCCC?
- Welche sozioökonomisch und technologisch möglichen Pfade zur Vermeidung einer solchen gefährlichen Klimaänderung stehen zur Verfügung?
- Wie können dabei alle Länder auf gerechte Weise in die Reduktionspflichten eingebunden werden?

Dazu muss der Blick weit über den Zeithorizont des zweiten Verpflichtungszeitraums des Kioto-Protokolls (nach 2012) hinausreichen, da eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf einem tolerablen Niveau nur mit einer langfristigen, ehrgeizigen Minderung der Treibhausgasemissionen erreichbar ist. Das Gutachten konzentriert sich auf die Potenziale zur Minderung der Emissionen von Kohlendioxid als wichtigstem anthropogenen Treibhausgas. Dabei werden zum einen die ökonomischen und technologischen Minderungspotenziale von Emissionen, zum anderen die Bedeutung biologischer Kohlenstoffsinken und die Möglichkeiten zu ihrem Erhalt untersucht. Schließlich werden konkrete Empfehlungen zur Ausgestaltung der politischen und ökonomischen Instrumente im zweiten Verpflichtungszeitraum des Kioto-Protokolls abgeleitet.

1

Definition eines gefährlichen Klimawandels

Es ist das zentrale Ziel der Klimarahmenkonvention, die Treibhausgaskonzentrationen zu stabilisieren, um einen gefährlichen, von Menschen verursachten Klimawandel zu verhindern. Artikel 2 UNFCCC definiert dieses Ziel näher: Ökosysteme sollen in der Lage sein, sich natürlich an den Klimawandel anzupassen, die Nahrungsmittelproduktion soll nicht gefährdet werden und eine nachhaltige ökonomische Entwicklung möglich bleiben. Der Beirat hat jedes dieser Kriterien auf die Frage hin geprüft, wo die Grenze liegt, ab der Klimafolgen nicht mehr tolerabel sind. Der heutige Stand der Wissenschaft erlaubt noch nicht, diese „Leitplanken“ stringent und quantitativ aus den zu vermeidenden Klimawirkungen herzuleiten. Daher musste sich der WBGU auf eine qualitative Einschätzung beschränken, die sich auf eigene Expertise, externe Gutachten und die Aufarbeitung der Literatur stützt.

Bei Ökosystemen sind die Effekte der Klimaänderungen schon heute erkennbar. Die Grenze, ab der die Schäden am globalen Naturerbe nicht mehr hinnehmbar sind, lässt sich nicht präzise bestimmen, wird aber vom WBGU im Bereich um 2°C globaler Erwärmung gegenüber vorindustriellen Werten eingeschätzt. Auch für die weltweite Ernährungssicherheit scheint die Grenze in diesem Bereich zu liegen, denn oberhalb dieses Wertes ist mit klimabedingten weltweiten Verlusten der Agrarproduktion sowie mit einem starken Anstieg der Anzahl der von Wassermangel bedrohten Menschen zu rechnen. Wegen der schwachen Datenlage und unausgereifter Methodik lässt sich für die Gesundheitsfolgen derzeit noch keine Toleranzschwelle einschätzen. Für einige Regionen können die Klimafolgen allerdings vermutlich bereits bei 2°C mittlerer globaler Erwärmung zu intolerablen Belastungen führen. Zudem könnte der Klimawandel singuläre, katastrophale Veränderungen im Erdsystem hervorrufen, wie z. B. die Umsteuerung der weltweiten Ozeanzirkulation, das Schmelzen großer Eisschilde (Westantarktis, Grönland) oder das plötzliche Freisetzen riesiger

Methanreserven. Eine quantitative Abschätzung der Schwellenwerte für diese Effekte ist mit großen Unsicherheiten behaftet.

WBGU-EMPFEHLUNG: MAXIMAL 2°C

ERWÄRMUNG VERANTWORTBAR

Der WBGU bekräftigt seine Überzeugung, dass zur Abwehr gefährlicher Klimaveränderungen die Klimaleitplanke einer maximalen Erwärmung um 2°C gegenüber vorindustriellen Werten eingehalten werden muss. Da die globale Mitteltemperatur seit der Industrialisierung bereits um 0,6°C gestiegen ist, ist eine weitere Erwärmung von nur noch 1,4°C tolerabel. Dabei sollte die globale, langfristig gemittelte Erwärmungsrate 0,2°C pro Jahrzehnt nicht überschreiten.

Dieses Klimafenster sollte als globales Ziel im Rahmen der UNFCCC vereinbart werden. Die EU sollte hier die Meinungsführerschaft anstreben.

2

Zulässige Emissionen

Der WBGU ermittelt zulässige Emissionspfade für energie- und industriebedingte Treibhausgase, die das WBGU-Klimafenster einhalten. Insbesondere die Abschätzung der Klimasensitivität, also derjenigen Temperaturerhöhung, die durch eine Verdoppelung der CO₂-Konzentration ausgelöst wird, ist jedoch mit großer Unsicherheit verbunden. Auch die Rolle der Biosphäre im Kohlenstoffkreislauf ist derzeit nicht hinreichend genau einschätzbar. Ebenso ist nur schwer zu beantworten, inwieweit zusätzlich andere Treibhausgase gemindert werden können.

WBGU-EMPFEHLUNG: EHRGEIZIGE

MINDERUNGSZIELE VEREINBAREN

Angesichts der großen Unsicherheiten über das Klimasystem empfiehlt der WBGU, im Sinn einer Absicherungsstrategie zunächst von einem CO₂-Konzentrationsziel unterhalb von 450 ppm auszugehen. Dies wird nur möglich sein, wenn bis 2050 eine Minderung der globalen energiebedingten CO₂-Emissionen um etwa 45–60% gegenüber 1990 erreicht wird. Zusätzlich müssen deutliche Minderungen der anderen Treibhausgase (insbesondere Methan und Lachgas, aber auch der fluorierten Verbindungen) und anderer indirekt klimawirksamer Stoffe (z. B. Ruß) erfolgen. Daher müssen die Industrieländer ihren Ausstoß von Treibhausgasen bis 2020 um mindestens 20% verringern.

3

Stabilisierungspfade: Klimaschutz und nachhaltige Entwicklung

Im Rahmen der WBGU-Absicherungsstrategie werden im regionalen und zeitlichen Vergleich Emissionsprofile mit Hilfe von Szenariorechnungen auf ihre technologische und wirtschaftliche Machbarkeit geprüft. Dazu hat der WBGU in Zusammenarbeit mit dem IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Österreich) CO₂-stabilisierende Szenarios entwickelt, die auf den vom IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) verwendeten Szenariofamilien beruhen. Emissionsminderungspfade in Szenariowelten, die von globaler Konvergenz und schneller technologischer Entwicklung geprägt sind (Szenarios A1T und B1), werden mit einem Emissionsreduktionspfad in einer „Business-as-usual“-Welt (B2) verglichen. Dabei werden im A1T-Szenario eine rasche technologische Entwicklung und im B1-Szenario die starke Berücksichtigung von Umweltaspekten vorausgesetzt, wobei zusätzliche Vorgaben die Einhaltung von Nachhaltigkeitskriterien in beiden Szenarios gewährleisten.

Aufbauend auf diesen Szenarios und auf zusätzlichen Annahmen zur Reduktion anderer Treibhausgase ist das WBGU-Klimaschutzziel für Werte der Klimasensitivität von bis zu 2,0°C (bei 450 ppm Stabilisierung) bzw. 2,4–2,9°C (400 ppm Stabilisierung, je nach Annahmen zu anderen Emissionen) erreichbar. Sollte sich herausstellen, dass die Klimasensitivität höher liegt als diese Werte (der IPCC schätzt den Wert im Bereich 1,5–4,5°C), müssten noch niedrigere CO₂-Konzentrationen angestrebt werden, um das WBGU-Klimafenster nicht zu verlassen.

Die erforderlichen Maßnahmen zur Minderung der energie- und industriebedingten CO₂-Emissionen lassen sich in drei Gruppen einteilen: Verstärkte Energieeinsparungen, strukturelle Veränderungen (insbesondere Einsatz erneuerbarer Energieformen und kohlenstoffarmer konventioneller Technologien) sowie geologische CO₂-Speicherung als Übergangstechnologie. In den Szenarios, die durch nachhaltige Energieversorgungssysteme und dynamische Technologieentwicklung charakterisiert sind (A1T, B1), wird angenommen, dass die Energieversorgung zum Ende des Jahrhunderts im Wesentlichen auf solarer Elektrizität und solar erzeugtem Wasserstoff beruht.

Bei der Bewertung der Kosten von Klimaschutzpfaden müssen die Kosten der CO₂-Minderung den Schäden und Anpassungskosten des andernfalls fortschreitenden Klimawandels sowie den vermiedenen anderen Schäden (etwa durch Luftverschmutzung) gegenübergestellt werden. Die gegenwärtig vorlie-

genden Abschätzungen sind mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet. Die Gesamtschäden im Fall eines Verzichts auf Klimapolitik werden in der Regel unterschätzt, weil Schäden an Gütern, die nicht an Märkten gehandelt werden, meist vernachlässigt oder unterbewertet werden. Zudem werden Schäden, die durch singuläre Veränderungen oder durch die Zunahme extremer Ereignisse entstehen, meist nicht berücksichtigt.

WBGU-EMPFEHLUNG: FINANZ- UND KAPITALTRANSFER IN ENTWICKLUNGSLÄNDER AUF NACHHALTIGKEIT AUSRICHTEN

Aus Effizienzgründen sollte die Klimapolitik kohärent mit globaler Struktur- und Entwicklungspolitik verzahnt werden. Dazu gehört eine verstärkte auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Entwicklungszusammenarbeit, eine weitestgehende Öffnung der Märkte für Produkte aus Entwicklungsländern sowie eine deutliche Erhöhung der Mittel für die Entwicklungszusammenarbeit.

Der Beirat verweist auf seine Empfehlungen für eine globale Energiepolitik (WBGU, 2003), die als weitere flankierende Maßnahmen greifen sollen. Dazu zählen der Abschluss eines Multilateralen Energiesubventionsabkommens (MESA) zum international abgestimmten Subventionsabbau sowie internationale Verpflichtungen zur deutlichen Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger an der Energieversorgung.

WBGU-EMPFEHLUNG: INVESTITIONEN IN FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG STEIGERN

Der WBGU bekräftigt seine Empfehlung nach einer Verzehnfachung der globalen Investitionen in Forschung und Entwicklung nachhaltiger Technologien bis zum Jahr 2020. Zu den Schwerpunkten sollten insbesondere Energieeffizienz und erneuerbare Energieträger zählen, aber auch die Nutzung nachhaltiger Potenziale zur Lagerung von Kohlendioxid in geologischen Lagerstätten (WBGU, 2003).

4

Reduktion von Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe

Da der Zielpfad zur Stabilisierung des CO₂-Niveaus eingehalten werden muss, wird global nur ein begrenztes Budget von Emissionsrechten zur Verfügung stehen. Die Zuteilung dieser Emissionsrechte an die Staaten sollte sich nach Meinung des WBGU vor allem am Gleichheitsprinzip sowie der Zielgenauigkeit in Bezug auf die CO₂-Emissionen orientieren. Sprunghafte Veränderungen bei den zulässigen

Emissionen einzelner Länder sollten vermieden werden.

WBGU-EMPFEHLUNG: GLEICHE PRO-KOPF-EMISSIONSRECHTE ANSTREBEN UND EMISSIONSANTEILE LINEAR ANGLEICHEN

Der WBGU empfiehlt eine Verteilung von Emissionsrechten für die im Kioto-Protokoll erfassten Treibhausgase nach dem Ansatz der „Verringerung und Konvergenz“ mit dem Jahr 2050 als Konvergenzjahr. Das bedeutet, dass die globalen Emissionen langfristig deutlich gemindert werden müssen („Verringerung“). In einem zweiten Schritt wird vereinbart, dass die Pro-Kopf-Emissionen aller Staaten kontinuierlich bis 2050 angeglichen werden müssen („Konvergenz“). Dabei müssen insbesondere die heute noch vergleichsweise hohen Pro-Kopf-Emissionen der Industrieländer gemindert werden, während einige Entwicklungsländer ihre Pro-Kopf-Emissionen zunächst noch steigern können. Eine plötzliche Umstellung auf gleiche Pro-Kopf-Emissionen ist gemäß des Prinzips der Stetigkeit wegen der damit verbundenen Belastung der Weltwirtschaft zu vermeiden. Vorausgesetzt wird außerdem ein funktionsfähiger globaler Emissionshandel, um die Kosten der Umstellung zu reduzieren.

WBGU-EMPFEHLUNG: TOLERANZKLAUSEL FÜR DIE ÄRMSTEN ENTWICKLUNGSLÄNDER ALS KOMPROMISSLÖSUNG

Für den Fall, dass sich verschiedene Entwicklungsländer zunächst nicht in der Lage sehen bzw. nicht bereit sind, ab dem zweiten Verpflichtungszeitraum absolute Emissionsbegrenzungen zu akzeptieren, könnte eine Toleranzklausel für wirtschaftlich weniger leistungsfähige Länder mit relativ geringen Pro-Kopf-Emissionen erwogen werden. Dazu sind Kriterien für die verbindliche Teilnahme am Prozess der Verringerung und Konvergenz notwendig. Wird ein Schwellenwert überschritten, der sich beispielsweise an den Pro-Kopf-Emissionen und dem Pro-Kopf-Einkommen orientiert, darf die Toleranzklausel nicht (mehr) beansprucht werden. Die Reduktionslast der Entwicklungsländer, welche die Toleranzklausel in Anspruch nehmen, würde entsprechend auf die teilnehmenden Länder umgelegt, damit die Einhaltung des Stabilisierungsziels und damit des Klimafensters gewährleistet ist.

5

Erhaltung der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme

Die terrestrische Biosphäre spielt im Kohlenstoffkreislauf eine große Rolle. Naturnahe Wälder,

Feuchtgebiete und Grasland sind wichtige Speicher für Kohlenstoff, solange sie nicht gerodet, entwässert oder umgepflügt werden. So verursacht die Entwaldung vor allem in den Tropen 10–30% der derzeitigen anthropogenen Emissionen von Kohlendioxid. Dennoch stellt die Biosphäre derzeit netto eine Senke für Kohlendioxid dar. Das derzeitige Anrechnungsverfahren biologischer Quellen und Senken im Kioto-Protokoll ist aber nicht geeignet, Anreize zum Erhalt dieser natürlichen Speicher zu geben (WBGU, 1998).

WBGU-EMPFEHLUNG: VOLLSTÄNDIGE KOHLENSTOFFBILANZ AUFSTELLEN

Aus dem Prinzip des „moderaten Anthropozentrismus“ und dem Vorsorgeansatz leitet der WBGU die Empfehlung zu einer stärkeren Berücksichtigung der terrestrischen biologischen Kohlenstoffvorräte und -senken in der Klimapolitik ab. Alle Kohlenstoffflüsse und -vorräte sollten vollständig erfasst werden (full carbon accounting). Der Beirat rät allerdings davon ab, zum jetzigen Zeitpunkt die Erhaltung der biologischen terrestrischen Kohlenstoffvorräte im gleichen System, mit dem gleichen Zuteilungsverfahren und mit denselben Instrumenten regeln zu wollen wie die Reduktionspflichten für fossile Kohlenstoffvorräte. Solche Bestrebungen könnten zu einer untragbaren Verzögerung der gesamten Klimaschutzanstrengungen führen.

WBGU-EMPFEHLUNG: ROLLE DER BIOSPHÄRE DURCH GESONDERTE VEREINBARUNG BERÜCKSICHTIGEN

Der WBGU empfiehlt, eine gesonderte zwischenstaatliche Verpflichtung zur Erhaltung der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme zu vereinbaren, etwa in Form eines „Protokolls zur Erhaltung der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme“ zur UNFCCC. Dabei würde nicht, wie bisher im Kioto-Protokoll, zwischen direkten und indirekten menschlichen Einflüssen (etwa dem CO₂-Düngeeffekt oder der Klimaänderung) oder natürlichen Faktoren (etwa der natürlichen Klimavariabilität) unterschieden. Vielmehr würde die vollständige Kohlenstoffbilanz aller Flächen gemessen und angeordnet (full carbon accounting).

Insbesondere für den Schutz natürlicher Ökosysteme, die wichtige Kohlenstoffspeicher sind (z. B. Primärwälder, Feuchtgebiete oder Grasländer), könnte ein internationales System handelbarer Nutzungsverzichtsverpflichtungen eingerichtet werden, ähnlich wie es der Beirat bereits für die globale Biodiversitätspolitik vorgestellt hat (WBGU, 2002).

6

Instrumente überprüfen und verbessern

Die Staatengemeinschaft hat in den letzten Jahren eine Reihe von Instrumenten für den globalen Klimaschutz konzipiert, teilweise in Pilotphasen getestet bzw. mit dem konkreten Einsatz dieser Instrumente begonnen. Auf der Grundlage bisheriger Erfahrungen empfiehlt der WBGU die Weiterentwicklung dieser Instrumente, um die Effizienz und Effektivität des internationalen Klimaschutzes zu erhöhen.

WBGU-EMPFEHLUNG: CHANCEN DES EMISSIONSHANDELS NUTZEN UND UNSICHERHEITEN MINIMIEREN

Um Unsicherheiten im globalen Emissionshandel vorzubeugen, empfiehlt der Beirat den Aufbau einer Klimazentralbank, angesiedelt im UNFCCC-Sekretariat. Primäre Aufgabe sollte die Glättung von Preissprüngen auf dem Zertifikatsmarkt sein. Dabei ist jedoch durch einen Regelautomatismus sicherzustellen, dass lediglich extreme Preisausschläge, nicht jedoch längerfristige Preistrends verhindert werden. Darüber hinaus sollte die Einführung einer variablen Preisuntergrenze für Zertifikate geprüft werden.

Um einen permanenten Innovationsdruck zur Entwicklung neuer Klimaschutztechnologien zu erzeugen, sollte die Möglichkeit des Erwerbs von Emissionsrechten zur Erfüllung nationaler Reduktionspflichten begrenzt werden. Verstärkte und andauernde Innovationsaktivitäten sind für die Einhaltung des Klimaschutzziels unerlässlich.

Der WBGU hält es ferner für dringlich, die Emissionen des internationalen Flugverkehrs und der Schifffahrt in den globalen Emissionshandel zu integrieren. Alternativ wären Entgelte für die Nutzung des Luftraums bzw. der Meere auf globaler oder zumindest auf europäischer Ebene zu erheben (WBGU, 2002).

WBGU-EMPFEHLUNG: KEIN HANDEL MIT EMISSIONSRECHTEN OHNE VERLÄSSLICHE INVENTARE

Die ökologische Zielgenauigkeit des Klimaschutzregimes darf nicht durch den Handel mit möglicherweise falsch ermittelten Emissionsrechten gefährdet werden. Daher empfiehlt der WBGU, die Teilnahme am Emissionshandel an die Bedingung zu knüpfen, dass qualitativ hochwertige Inventare vorliegen. Entwicklungsländer sollten daher in stärkerem Maße als bisher bei der Aufstellung von aussagekräftigen Inventaren unterstützt werden.

WBGU-EMPFEHLUNG: CDM ALS ÜBERGANGSINSTRUMENT NUTZEN

Länder, die nicht über hinreichend hochwertige Inventare verfügen, bzw. die noch nicht an der „Verringerung und Konvergenz“ teilnehmen, können über den Clean Development Mechanism (CDM) in den Klimaschutz eingebunden werden. Dazu sollen spezielle Anreize für CDM-Projekte in den am wenigsten entwickelten Ländern geschaffen sowie der Ansatz der Zusätzlichkeit von Investitionen (investment additionality) für Großprojekte verpflichtend vorgeschrieben werden. Angesichts der fragwürdigen Wirkungen bisheriger Projekte im Bereich biologischer Senken und der WBGU-Empfehlung eines gesonderten Protokolls zur Erhaltung der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme sollten Senkenprojekte vom CDM zukünftig ausgeschlossen werden. Nukleare Projekte sollten grundsätzlich nicht durch CDM gefördert werden. Beim Instrument der Joint Implementation (JI) rät der WBGU zu überprüfen, inwieweit die JI vollständig im Emissionshandel aufgehen sollte bzw. ob sie sich mit dem CDM verschmelzen ließe. Die einseitige Belastung des CDM durch eine Abgabe zur Finanzierung des Anpassungsfonds sollte entfallen. Der WBGU plädiert stattdessen dafür, dass auf alle Transaktionen im Rahmen der flexiblen Mechanismen eine Gebühr lediglich in Höhe der administrativen Kosten erhoben wird, die durch die Abwicklung des Emissionshandels bzw. CDM und JI entstehen.

WBGU-EMPFEHLUNG: ANPASSUNGS- UND KOMPENSATIONSFONDS GEMÄSS DER VERANTWORTUNG FÜR DIE GLOBALE ERWÄRMUNG FINANZIEREN

Die Finanzierung des Anpassungsfonds durch eine Abgabe auf CDM-Projekte ist weder sinnvoll, noch ist die Speisung des LDC-Fonds und des speziellen Klimaschutzfonds durch freiwillige ad-hoc-Beiträge ausreichend. Dieser unter dem Dach der GEF geschaffene Klimaschutzfonds sollte durch verbindliche Beiträge der Staaten zuverlässig finanziert und die Mittel deutlich aufgestockt werden. Die Ausgestaltung der Fonds sollte verbessert werden, damit die Mittelverwendung gezielt zu einer nachhaltigen Entwicklung in den Empfängerstaaten beiträgt. Spätestens in der zweiten Verpflichtungsperiode sollte ein Kompensationsfonds vorgesehen werden, aus dem Zahlungen zum Ausgleich von Klimaschäden finanziert werden.

Die Finanzierungsbeiträge der einzelnen Staaten – besonders für den Kompensations- und den Anpassungsfonds – sollten sich an ihren jeweiligen Beiträgen zur globalen Erwärmung, also an den kumulierten Emissionsmengen orientieren. Dabei sollten nur Emissionen seit 1990 berücksichtigt werden, weil der

Staatengemeinschaft erst seit der Veröffentlichung des ersten Sachstandsberichts des IPCC in diesem Jahr das Problem und die Schwere der Folgen zwingend bekannt ist.

WBGU-EMPFEHLUNG: SANKTIONEN GEGENÜBER TRITTBRETTFAHRERN ERWÄGEN

Der Beirat hält eine Reform der vorgesehenen Sanktionsmechanismen gegenüber Ländern, die eingegangenen Verpflichtungen nicht nachkommen, zum jetzigen Zeitpunkt nicht für dringlich. Jedoch sollte frühzeitig diskutiert werden, mit welchen Anreizen und Sanktionen Ländern begegnet wird, die dem Klimaschutzregime grundsätzlich fern bleiben. Der WBGU empfiehlt, dass die Staatengemeinschaft sich von Beginn an die Option für harte politische und ökonomische Sanktionen insbesondere gegenüber Großemittenten offenhält.

7 Entscheidende Weichenstellungen stehen noch bevor

Die Staatengemeinschaft muss in den kommenden Jahren entscheidende Weichenstellungen in der internationalen Klimapolitik vornehmen, wenn gefährliche Klimaänderungen vermieden werden sollen. Dabei verringern sich die Handlungsspielräume mit jeder weiteren Verzögerung einer konsequenten Klimapolitik. Die Klimarahmenkonvention bietet einen unverzichtbaren Rahmen für kommende Verhandlungen.

DAS KIOTO-PROTOKOLL

Das Kioto-Protokoll zur UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) ist auch 6 Jahre nach seiner Zeichnung in Japan noch nicht rechtsverbindlich. In Erwartung einer Ratifikation durch die Russische Föderation und damit des Inkrafttretens des Protokolls führen aber schon heute viele Länder Programme zu seiner Umsetzung durch. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Klimawandel weisen immer deutlicher darauf hin, dass die Minderungen der Treibhausgase erheblich ehrgeiziger ausfallen müssen als im Kioto-Protokoll (KP) bisher vorgegeben. Die Weiterentwicklung des internationalen Klimaregimes wird daher in den nächsten Jahrzehnten eine drängende Aufgabe für die internationale Politik bleiben.

Die Klimarahmenkonvention, das Kioto-Protokoll und die Vereinbarungen von Marrakesch bilden ein Vertragspaket für den internationalen Klimaschutz, das über 10 Jahre verhandelt wurde. Im Zentrum stehen quantifizierte Emissionsbegrenzungen und Reduktionsverpflichtungen, die in ein System von Berichten, Monitoring, Überprüfung und Einhaltung eingebettet sind. Wichtigstes Prinzip ist die gemeinsame, aber differenzierte Verantwortung (Art. 3.1 UNFCCC). Bisher wird bei den Verpflichtungen zwischen zwei Ländergruppen unterschieden: Industrie- und Entwicklungsländer. Verbindliche Reduktionsziele wurden nur für die Industrieländer einschließlich der Transformationsländer vereinbart. Zur Unterstützung der Entwicklungsländer übernahmen die OECD-Länder zusätzliche finanzielle Verpflichtungen.

Die komplexe Struktur der Kioto-Mechanismen (Emissionshandel, Joint Implementation, Clean Development Mechanism – CDM) eröffnet verschiedene Wege, um die Ziele zu erreichen, und mindert so die Erfüllungskosten. Der CDM soll darüber hinaus den Entwicklungsländern helfen, sich nachhaltig zu entwickeln und zum Klimaschutz beizutragen (Art. 12 KP). Ob diese Erwartungen erfüllt werden, bleibt abzuwarten. Besondere Aufmerksamkeit gilt in diesem Zusammenhang auch dem neuen Klimafonds, der in Marrakesch vereinbart wurde und zu

zusätzlichen Finanztransfers für Anpassungsmaßnahmen in besonders verwundbaren Entwicklungsländern führen soll.

Kritisch zu hinterfragen ist die Umwelteffektivität des Kioto-Protokolls in der heute gültigen Form: Selbst wenn die Industrieländer (Anlage-I-Staaten) eine 5%ige Emissionsreduktion erreichen, würde die erwartete Temperaturerhöhung nur geringfügig gedämpft. Die realen Reduktionspflichten fallen niedriger aus als die ohnehin schon bescheidenen nominalen Reduktionen, weil Senken als Emissionsminderung angerechnet wurden und einige Länder in Zukunft mehr CO₂ emittieren dürfen als gemäß „Business-as-usual“-Projektionen erwartet wird. Außerdem entfällt mit dem Rückzug der Vereinigten Staaten aus dem Kioto-Protokoll ein potenziell großer Nachfrager nach Emissionsrechten, was vermutlich zu einem Überangebot an handelbaren Emissionszertifikaten und somit zu niedrigeren Anreizen für Emissionsreduktionen führt. Den Ländern steht aber frei, nur Teile der ihnen zugeteilten Zertifikate zu vermarkten.

Jede Bewertung der Kioto-Vereinbarungen sollte berücksichtigen, dass die Verpflichtungsperiode 2008–2012 nur ein erster Schritt ist, dem weitere folgen sollen und müssen. In den folgenden Verpflichtungsperioden werden weit einschneidendere Emissionsbeschränkungen notwendig sein, um das gemeinsame Ziel von Protokoll und Klimarahmenkonvention zu erreichen: die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau, bei dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Der zur Vermeidung gefährlicher Klimaänderungen verbleibende Spielraum für die globalen Emissionen hat sich in den vergangenen Jahren weiter verringert. Die zweite Verpflichtungsperiode wird von großer Bedeutung sein, weil sich hier entscheidet, ob durch die für diesen Zeitraum vereinbarten Reduktionen eine gefährliche Klimaänderung vermieden werden kann oder nicht.

Der WBGU betont, dass aufgrund mangelnder Alternativen jedes Infragestellen des Kioto-Protokolls die globale Klimapolitik um viele Jahre zurück-

werfen und die Vermeidung gefährlicher Klimafolgen erheblich erschweren würde.

ZUKÜNFTIGE SCHRITTE IM KLIMASCHUTZ

Die Völkergemeinschaft steht vor einem Dilemma. Um das Erreichen der Kioto-Ziele sicherzustellen, müssen die globalen Emissionen bald nach Erreichen ihres Maximums drastisch absinken. Das heißt aber auch, dass die Emissionen der Entwicklungsländer sehr viel früher von ihrem Business-as-usual-Pfad abweichen müssen, als es ihnen gerecht erscheint. Insbesondere müssen diese Länder den Anstieg ihrer Emissionen dämpfen und letztlich auch Emissionen reduzieren, bevor sie den Annex-I-Ländern vergleichbare Einkommen erzielen.

Dieses Dilemma zu überwinden und eine gerechte und nachhaltige Lösung zu finden, steht im Mittelpunkt des Gutachtens und voraussichtlich auch der Verhandlungen zum zweiten Verpflichtungszeitraum des Kioto-Protokolls. Die Verhandlungen hierzu sollten spätestens im Jahr 2005 beginnen (Art. 3.9 KP). Die Industrieländer sollten daher so schnell wie möglich Fortschritte bei den übernommenen Emissionsreduktionen vorweisen können und so bei den Entwicklungsländern Vertrauen in die Klimapolitik schaffen. Dazu kann auch ein Technologietransfer in die Entwicklungsländer beitragen. Schließlich sollten die Verhandlungen zur zweiten Verpflichtungsperiode die Option für den erneuten Beitritt der Vereinigten Staaten von Amerika offen halten.

Die Verhandlungen stehen aufgrund der Komplexität vor großen Herausforderungen. Weil die Zahl der Länder mit Verpflichtungen zu Emissionsbegrenzungen und -reduktionen wachsen muss, werden Aspekte der Gleichbehandlung und einer fairen Differenzierung der Verpflichtungen einen sehr viel größeren Raum einnehmen als in der ersten Verpflichtungsperiode. Die Notwendigkeit drastischer Einschränkungen der Emissionen wird die Diskussion über die Definition einer gefährlichen Klimaänderung und über ökonomische und technische Optionen der Emissionsminderungen voran treiben.

ÜBER 2012 HINAUSBLICKEN

Der WBGU möchte mit dem vorliegenden Gutachten der Bundesregierung wissenschaftlich fundierte Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung der internationalen Klimapolitik vermitteln. Dazu muss der Blick weit über den Zeithorizont des zweiten Verpflichtungszeitraums des Kioto-Protokolls (nach 2012) hinausgehen. Eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf einem sicheren Niveau ist nur mit einer langfristigen, ehrgeizigen Minde-

rung der Treibhausgasemissionen erreichbar. Drei Fragen stehen dabei im Mittelpunkt:

- Was ist eine „gefährliche Klimaänderung“ im Sinne des Artikels 2 UNFCCC?
- Welche sozioökonomisch und technologisch möglichen Pfade zur Vermeidung einer solchen gefährlichen Klimaänderung stehen zur Verfügung?
- Wie können alle Länder gerecht in die Emissionsreduktionspflichten eingebunden werden?

Das Gutachten konzentriert sich auf die Potenziale zur Minderung der Emissionen von Kohlendioxid als dem wichtigsten anthropogenen Treibhausgas. Es werden aber auch die notwendigen Minderungen anderer Treibhausgase angesprochen. Zunächst wird versucht, eine gefährliche Klimaänderung zu definieren (Kap. 2.1). Nach der Diskussion über die Auswirkungen des WBGU-Klimafensters für die Definition „sicherer“ Konzentrationsziele und Emissionspfade (Kap. 2.2) steht die Frage nach der Verteilung von Emissionsrechten bzw. Reduktionspflichten (Kap. 2.3) und der ökonomischen und technologischen Machbarkeit ehrgeiziger Reduktionspfade im Mittelpunkt (Kap. 3). Dazu werden Szenarios vorgelegt, die mittels eines Energiesystemmodells und integriertem makroökonomischen Modell erzeugt wurden. Neben dem Klimaschutz werden auch andere Leitplanken berücksichtigt, insbesondere sozioökonomische.

Bei den Verhandlungen zum Kioto-Protokoll war die Anrechnung von Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstaktivitäten sehr strittig. Der Beirat warnte bereits früh vor den möglichen negativen Anreizen und Risiken, die mit dem heute vereinbarten System der Berechnung verbunden sind (WBGU, 1998). Kapitel 4 behandelt den zukünftigen Umgang mit Quellen und Senken in der terrestrischen Biosphäre.

Schlussfolgerungen zur Weiterentwicklung der institutionellen Architektur des Kioto-Protokolls werden in Kapitel 5 gezogen. Dabei werden zwei Schwerpunkte gesetzt: Zum einen wird auf die institutionellen Veränderungen eingegangen, die notwendig sind, um die Verpflichtungen zur Emissionsreduktion zu stärken und die Zahl der davon betroffenen Länder zu erweitern. Zum anderen werden erste Vorschläge entwickelt, wie in Zukunft mit allen Kohlenstoffquellen, -senken und -vorräten der terrestrischen Biosphäre umgegangen werden sollte. Kapitel 6 fasst die Empfehlungen des WBGU zur Weiterentwicklung der internationalen Klimapolitik zusammen.

2.1

Was ist gefährlicher Klimawandel?

2.1.1

Das Konzept des Klimafensters

Artikel 2 der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) legt das Ziel der Konvention folgendermaßen fest:

„Das Endziel dieses Übereinkommens [...] ist es, [...] die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann.“

Der Artikel besteht aus zwei Komponenten: erstens dem Ziel selbst (Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen) und zweitens den Kriterien für den Zeitraum, in dem die Ziele erreicht werden sollen (betreffend Ökosysteme, Nahrungsmittelproduktion und nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung).

Der Beirat hält es für problematisch, den Schwerpunkt auf die Treibhausgaskonzentration zu legen anstatt auf die Klimaänderungen selbst, da eine Einschätzung der Auswirkungen bestimmter Konzentrationen auf das Klima aufgrund der vielen Unsicherheiten schwierig ist (Kap. 2.2). Daher definiert der WBGU gefährlichen Klimawandel mit Hilfe der Veränderungen von *Klimaparametern*. Die globale mittlere Lufttemperatur nahe des Erdbodens (Globale Mitteltemperatur, GMT) wurde als Leitindikator verwendet, da diese besser als andere Indikatoren auf Treibhausgaskonzentrationen bezogen werden kann (Smith et al., 2001). Die globale Mitteltemperatur steht als globale Näherung (Proxy) für die ver-

schiedenen Erscheinungen des Klimawandels, die auf regionaler oder lokaler Ebene Wirkungen zeigen. Je nach Region kann sich eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur z. B. in erhöhtem lokalen Meeresspiegel, verringerter Bodenfeuchte, erhöhten Windspitzengeschwindigkeiten oder sogar verringerten lokalen Lufttemperaturen ausdrücken.

In früheren Gutachten hat der Beirat ein „Klimatoleranzfenster“ definiert und so bestimmte Klimabedingungen aufgrund einer normativen Setzung für nicht hinnehmbar erklärt („Tolerable Windows Approach“; WBGU, 1995, 1997, 2003). Dieses Klimafenster besteht aus zwei Obergrenzen: Die globale Mitteltemperatur soll nicht mehr als +2°C gegenüber vorindustriellen Werten (zwischen 1861 und 1890) steigen und die Klimaänderungsrate soll nicht mehr als 0,2°C pro Jahrzehnt betragen. Darüber hinaus nimmt der Beirat an, dass die Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme sowie wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Systeme mit zunehmender Annäherung an die Temperaturobergrenze von 2°C abnimmt. Der WBGU betont, dass selbst das Einhalten des Klimafensters nicht alle Schäden an Ökosystemen oder auch die Bedrohung von Menschen verhindern kann, da globale Maxima nicht die erheblichen Unterschiede der Klimawirkungen in verschiedenen Regionen und Sektoren widerspiegeln können (WBGU, 1997).

PRIMÄRE OBERGRENZE: GLOBALE MITTELTEMPERATUR

Die Obergrenze der absoluten Klimaerwärmung von 2°C gegenüber der vorindustriellen Temperatur orientiert sich an der beobachteten Schwankungsbreite im jüngeren Quartär (über die letzten Hunderttausende von Jahren), das unser heutiges Klima und die Entwicklung der Menschheit geprägt hat. Die höchste beobachtete globale Mitteltemperatur in dieser Periode lag 1,5°C oberhalb der vorindustriellen globalen Mitteltemperatur. Um der verbesserten Anpassungsfähigkeit Rechnung zu tragen, addierte der Beirat in seinem Jahresgutachten 1995 0,5°C. Da sich die globale Mitteltemperatur bereits um 0,6 (±0,2)°C erhöht hat, beträgt der Abstand von dieser

Grenze nur noch ca. 1,4°C. Der WBGU kam zu dem Schluss, dass intolerable Schäden in der Zusammensetzung und Funktion der heutigen Ökosysteme nicht ausgeschlossen werden können, wenn die globale Mitteltemperatur um mehr als 2°C ansteigt (WBGU, 1995). Allerdings sind bereits unterhalb dieser Grenze erhebliche Auswirkungen zu erwarten. Da sich die wissenschaftliche Grundlage für diese Obergrenze seither gefestigt hat und sie auch an Hand anderer Kriterien hergeleitet werden kann (Kap. 2.1.2–2.1.6), hält der WBGU an dieser Argumentation fest.

SEKUNDÄRE OBERGRENZE:

KLIMAÄNDERUNGSRATE

Die vom Beirat definierte maximale Änderungsrate von 0,2°C pro Jahrzehnt bezieht sich auf die Änderung der globalen Mitteltemperatur, zeitlich gemittelt über mehrere Jahrzehnte. Auf regionaler Ebene wurden Temperaturschwankungen beobachtet, die viel größer waren als 0,2°C pro Jahrzehnt, ohne Schäden an Ökosystemen zu verursachen. Die globale troposphärische Mitteltemperatur weist derzeit eine Zunahme von 0,22°C pro Jahrzehnt auf, dabei wurde allerdings nur über 24 Jahre gemittelt (Vinnikov und Grody, 2003). Je größer der Zeitraum ist, über den gemittelt wird, desto geringer werden die beobachteten Änderungsraten. Die Analysen von hemisphärischen oder globalen Langzeitserien zeigen, dass über mehrere Jahrzehnte gemittelte Änderungsraten jenseits von 0,1°C pro Jahrzehnt ungewöhnlich sind (Hare, 2003).

Die erwarteten globalen und – in vielen Fällen – lokalen Klimaänderungsraten werden wahrscheinlich größer sein als die der letzten Millionen Jahre (Overpeck et al., 2003). Die 0,2°C pro Jahrzehnt beruhen auf der Einschätzung, dass eine vom Klimawandel verursachte zusätzliche finanzielle Last von mehr als 5% des weltweiten BIP nicht hinnehmbar wäre (WBGU, 1995). Auch ist zu befürchten, dass rasche Klimaveränderungen die Grenzen der Anpassungsfähigkeit der Tier- und Pflanzenarten überschreiten und somit Ökosysteme schädigen können. Die prognostizierte Klimaerwärmung könnte weit aus größere Wanderungsgeschwindigkeiten der Arten erfordern, als während der Nacheiszeiten auftraten (Malcolm et al., 2002), was wiederum das Überleben vieler Arten gefährden könnte (Davis und Shaw, 2001). Zudem kann eine hohe Änderungsrate das Risiko großräumiger, singulärer Ereignisse erhöhen (Kap. 2.1.6). Seit der Veröffentlichung der bisherigen WBGU-Gutachten zu diesem Thema (WBGU, 1995, 1997) wurden nur wenig neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu den tolerablen Änderungsraten der globalen Mitteltemperatur gewonnen. Die wissenschaftliche Grundlage für diese

Grenze bleibt daher weniger belastbar als für die globale Mitteltemperatur.

Die ökologischen wie ökonomischen Auswirkungen jenseits dieser Grenze sind nur schwer abzuschätzen, könnten aber potenziell große Ausmaße annehmen. Aus diesen Gründen hält der WBGU gemäß des Vorsorgeansatzes die Grenze von 0,2°C pro Dekade (gemittelt über mehrere Jahrzehnte) aufrecht, betont aber die Notwendigkeit von verstärkter Forschung auf diesem Gebiet.

KLIMAWIRKUNGSANALYSE

Mit diesem Gutachten wird versucht, den bisherigen „Top-down“-Ansatz um einen „Bottom-up“-Ansatz zur Herleitung der primären Obergrenze der globalen Mitteltemperatur zu ergänzen, der sich auf unseren gegenwärtigen Kenntnisstand über Klimawirkungen gründet. Die Wirkungsanalyse stützt sich im Wesentlichen auf die drei Kriterien des Artikels 2 UNFCCC (Ökosysteme, Nahrungsmittelproduktion und nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung), da sie wahrscheinlich der wichtigste Bezugspunkt in den politischen Verhandlungen zur zweiten Verpflichtungsperiode des Kioto-Protokolls werden. Sie wird vom WBGU um weitere Kriterien ergänzt, auch auf Grundlage der „Gründe zur Besorgnis“ des IPCC (2001b). Der Beirat behandelt die Kriterien „Gesundheit“, „Wasserverfügbarkeit“ und „großräumige singuläre Ereignisse“ daher in eigenen Abschnitten. Die Folgen extremer Wetterereignisse sind für mehrere der vom WBGU verwendeten Kriterien von Bedeutung und werden daher jeweils dort behandelt.

Der WBGU interpretiert eine „gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems“ als eine Störung, die zu gefährlichen Klimawirkungen führt. Bei der Beurteilung, ob eine bestimmte Wirkung als gefährlich anzusehen ist, muss die Anpassungsfähigkeit natürlicher und gesellschaftlicher Systeme berücksichtigt werden. Die Anpassungsfähigkeit variiert stark zwischen Regionen und Systemen und hängt zudem von der Geschwindigkeit der Klimaänderungen ab. Die Abschätzung der Kosten und des Nutzens von Anpassung, auch im Verhältnis zur Emissionsminderung, ist nicht vollständig möglich und würde den Rahmen dieses Gutachtens sprengen.

Der WBGU definiert eine anthropogene Störung des Klimasystems dann als gefährlich, wenn sie zu schwer wiegenden Wirkungen in großen Regionen führt oder es zu einer global signifikanten Akkumulation von verteilten regionalen Wirkungen kommt. Bei der Definition von schwer wiegenden Klimawirkungen muss sich der Beirat auf intersubjektive, d. h. für alle gleichermaßen gültige Werturteile verlassen (WBGU, 1999b), die auf dem aktuellen wissenschaftlichen Sachstand beruhen – insbesondere dem drit-

ten Sachstandsbericht des IPCC (2001a, b, c) und nachfolgend erschienener relevanter Veröffentlichungen. Die Gefahreinschätzung leitet der WBGU aus einer „moderat anthropozentrischen“ Perspektive ab. Diese betont die Einzigartigkeit des Menschen, leitet aber aus der lebenserhaltenden und -verschönernden Bedeutung der Natur die Verpflichtung des Menschen ab, sie auch für die kommenden Generationen zu erhalten (Kap. 6; WBGU, 1999b). In einigen Fällen wird die Beurteilung dadurch erleichtert, dass sie auf bekannte Schwellenwerte in natürlichen oder gesellschaftlichen Systemen gestützt werden kann, jenseits derer die Klimawirkungen drastisch zunehmen oder großskalige irreversible Veränderungen ausgelöst werden.

In den folgenden Kapiteln werden mögliche Wirkungen analysiert und dann mittels Experteneinschätzung in Werte der dazugehörigen globalen Mitteltemperatur überführt. Diese Werte werden sich zwischen den verschiedenen Kriterien unterscheiden. Auf Grundlage dieser Analyse legt der Beirat schließlich einen Schwellenwert fest, über den hinaus er jede Zunahme der globalen Mitteltemperatur als gefährlich ansieht.

2.1.2

Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme

2.1.2.1

Ökosysteme und Klimawandel

Heutige natürliche Ökosysteme haben bereits erhebliche Flächenverluste durch anthropogene Landnutzungsänderungen erleiden müssen, die großskalige Habitatzerstörung und -fragmentierung verursacht haben. Die Landnutzung hat das Angesicht der Erde erheblich verändert (Vitousek et al., 1997) und z. B. nur 20% der Wälder weltweit unangetastet gelassen (Bryant et al., 1997). Hinzu kommen andere menschliche Eingriffe, etwa Übernutzung (z. B. durch Jagd, Beweidung, Fischerei oder nichtnachhaltige Nutzung von Forstprodukten), die Einführung gebietsfremder Arten oder die Umweltverschmutzung. Gemeinsam haben diese anthropogenen Belastungen zu Aussterberaten von Arten geführt, die 2–3 Größenordnungen über der natürlichen, aus fossilen Daten abgeleiteten Hintergrundrate liegen (May et al., 1995).

Mit dem anthropogenen Klimawandel kommt ein neuer Faktor hinzu. Ökosysteme und ihre biologische Vielfalt können irreversible Schäden durch Klimaveränderungen erleiden, weil der Anpassungsfähigkeit der Arten Grenzen gesetzt sind. Gemessen an den zuvor erwähnten menschlichen Eingriffen fallen heutige Klimawirkungen noch gering aus. Es wird

allerdings erwartet, dass sie in den nächsten Jahrzehnten sowohl an Umfang als auch Geschwindigkeit rasch zunehmen werden (IPCC, 2001b). Selbst wenn wir auf magische Weise die Ökosysteme von allen anderen schädlichen anthropogenen Einflüssen befreien könnten, hätte der rasche Klimawandel allein immer noch das Potenzial, einen signifikanten Verlust an biologischer Vielfalt herbei zu führen.

Im 20. Jahrhundert hat die globale Mitteltemperatur um $0,6(\pm 0,2)^\circ\text{C}$ zugenommen und verursacht bereits heute eine erkennbare Wirkung auf freilebende Tier- und Pflanzenpopulationen (IPCC, 2001b; Root et al., 2003). Diese reagieren mit dem erwarteten Trend in höhere und polwärts gelegene Gebiete (Verschiebung polwärts um 6 km pro Jahrzehnt; Parmesan und Yohe, 2003). Die geografische Ausdehnung, das Ausmaß der Schäden und die Anzahl der betroffenen Ökosysteme steigt sowohl mit Ausmaß als auch Geschwindigkeit des Klimawandels (IPCC, 2001b). Die Folgen sind Veränderungen im subtilen Gleichgewicht der Interaktionen zwischen den Arten (z. B. Konkurrenz, Räuber-Beute-Beziehungen oder Parasitismus) in bewirtschafteten wie natürlichen Ökosystemen, was wiederum zu Artenverlust, Störungen der Lebensgemeinschaften und Ökosystemsukzession führen kann (Hughes, 2000). Ein Beispiel für solche Gefahren ist der erhebliche Schaden an Korallenriffen wegen des raschen Meeresspiegelanstiegs und der erhöhten Meerwassertemperatur (Hughes et al., 2003; andere Beispiele in Hare, 2003).

Nicht alle Ökosysteme werden von mäßigen Klimaveränderungen gefährdet, z. B. wenn die Arten aufwärts oder polwärts wandern können, ohne durch geografische oder anthropogene Barrieren daran gehindert zu werden. Diese Anpassung kann durch Planung, Management und Vernetzung von Schutzgebieten, durch Entfernung von Wanderungsbarrieren sowie durch verändertes Management von Landschaften und Bioregionen gefördert werden.

Im Folgenden soll kurz der Wissensstand zu den Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Ökosysteme dargestellt werden. Es gibt einen großen Fundus an Literatur über die Wirkungen von Klimaveränderungen auf Ökosysteme und biologische Vielfalt, der vom IPCC in seinem dritten Sachstandsbericht (IPCC, 2001b), in einem technischen Bericht (IPCC, 2002) und von einer Expertengruppe der Biodiversitätskonvention (CBD, 2003) begutachtet und zusammenfassend bewertet worden ist. Dabei ist zu bedenken, dass die Aussagekraft jeder heutigen, auf Fallstudien gegründeten Untersuchung darunter leidet, dass die weltweiten Ökosystemtypen und Regionen mit sehr unterschiedlicher Intensität untersucht worden sind. Dies begründet den dringenden Bedarf an systematischer Forschung, ganz

besonders auf dem Gebiet der integrierten regionalen Wirkungsforschung.

Anhand der Übersicht über die Ergebnisse der genannten Berichte, einer vom Beirat in Auftrag gegebenen Studie (Hare, 2003) und weiterer Veröffentlichungen (siehe Zitate in den folgenden Punkten) kommt der WBGU zu folgenden Schlussfolgerungen (Abb. 2.1-1):

- *Anstieg bis zu 1°C über das vorindustrielle Niveau:* Bis zu 10% der weltweiten Ökosystemfläche wird sich in ihrer Ausdehnung verändern (Toth et al., 2002; Leemans und Eikhout, 2003). Einige Waldökosysteme werden erhöhte Nettoprimärproduktivität, Feuerhäufigkeit und Schädlingsbefall zeigen. Einige Hotspots und Schutzgebiete von weltweiter Bedeutung müssen erste klimabedingte Verluste hinnehmen. Korallenriffe werden vermehrtes Bleichen erleiden (Hughes et al., 2003). Die Verbreitungsgebiete von Arten werden sich verschieben und einige gefährdete Arten werden wahrscheinlich stärker vom Aussterben bedroht sein. Die meisten dieser Wirkungen sind bereits heute zu beobachten.
- *Anstieg von 1–2°C über das vorindustrielle Niveau:* Bis zu 15–20% der weltweiten Ökosystemfläche werden sich verschieben. Einige Schutzgebiete von weltweiter Bedeutung und Hotspots der biologischen Vielfalt werden voraussichtlich schwer

wiegende Verluste an Fläche und Arten erleiden. Die Fauna arktischer Ökosysteme wird geschädigt (z. B. Eisbär, Walross). Das Korallenbleichen wird wahrscheinlich so häufig auftreten, dass die Erholung der Riffe nicht mehr ausreichen wird, um schwer wiegende Verluste an biologischer Vielfalt zu vermeiden.

- *Anstieg von mehr als 2°C über das vorindustrielle Niveau:* Wahrscheinlich werden sich mehr als 20% der weltweiten Ökosystemfläche verschieben. Dieser Wert wird in einigen Regionen weit höher liegen. Der globale Verlust an Küstenfeuchtgebieten kann 10% übersteigen (Arnell et al., 2002). Die Korallenriffe werden im globalen Maßstab schwere Störungen und Artenverluste erfahren, aber vielleicht nicht gänzlich verschwinden (Hughes et al., 2003). Verbreitungsgebiete werden sich verschieben und dadurch eine große Anzahl von Arten gefährden. Es besteht die Gefahr, dass einige Schutzgebiete von weltweiter Bedeutung und Hotspots klimabedingt den überwiegenden Teil ihrer Fläche verlieren.

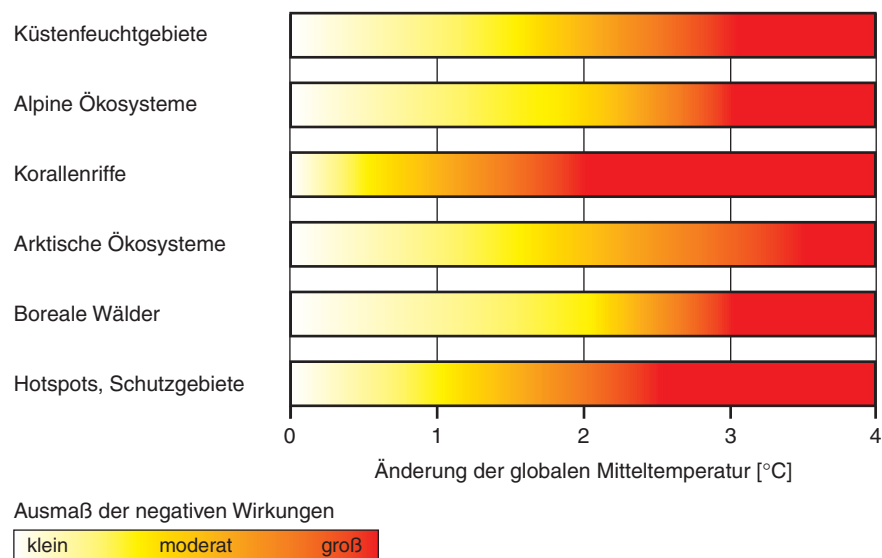


Abbildung 2.1-1

Visualisierung klimabedingter Wirkungen auf einige Ökosysteme. Das Risiko negativer Wirkungen steigt mit dem Ausmaß der Klimaänderungen. Der Anstieg der globalen Mitteltemperatur seit 1861–1890 wird hierfür als Proxy verwendet. Es wurde versucht, eine globale Zusammenschau der erwarteten negativen Wirkungen auf weltweite Ökosysteme in Form einer hochaggregierten Konzeptualisierung darzustellen. Regionale Wirkungen können weniger oder auch schwerer wiegen als die gezeigten globalen Durchschnitte. Die Grafiken stellen nicht einen quantitativen Ansatz dar sondern eine unscharfe Beurteilung von Risiken, die auf Fallstudien und Begutachtungen beruht, wie sie ähnlich auch vom IPCC (2001b) gezeigt wurden. Die Beurteilung berücksichtigt nur das Ausmaß der Klimaveränderungen, nicht die Änderungsrate.

Quelle: WBGU

2.1.2.2

Toleranzgrenzen für Klimawirkungen auf Ökosysteme

Artikel 2 UNFCCC bezieht sich auf die Fähigkeit der Ökosysteme, sich „auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen“ zu können. Diese Fähigkeit übersetzt sich sowohl in eine absolute Obergrenze der Klimaänderung als auch in eine Obergrenze der Änderungsrate. Werden diese Grenzen überschritten, so nimmt der Artenverlust zu, was wiederum zu Ökosystemdegradation und -verlust führen kann. Dies ist nicht nur von Bedeutung, weil mit dem Verlust biologischer Vielfalt auch ihre Erholungs-, Kultur und Eigenwerte verloren gehen (WBGU, 2000). Schwerer wiegt noch, dass die menschliche Gesellschaft direkt oder indirekt von den Gütern und Dienstleistungen der Biosphäre und ihrer Ökosysteme abhängt. Die Zusammensetzung der Atmosphäre und der Böden, die Kreisläufe der Elemente und viele andere wichtige Prozesse basieren auf belebten Vorgängen – sie alle werden durch Ökosysteme in Gang gehalten oder erneuert (Alcamo et al., 2003). Klimabedingte Verluste an ökosystemaren Gütern oder Dienstleistungen dürfen daher eine bestimmte Grenze nicht überschreiten.

Wegen der Bedeutung der biologischen Vielfalt für die Gesellschaft wird ihre Erhaltung als Prinzip des internationalen Rechts anerkannt. Der WBGU gründet seine Beurteilung der Gefährlichkeit oder Schwere der erwarteten Verluste biologischer Vielfalt auf Regeln, die in der Biodiversitätskonvention und anderen internationalen Abkommen (z. B. Washingtoner Artenschutzübereinkommen, Ramsar-Konvention, Welterbekonvention) und Prinzipien (z. B. der Vorsorgeansatz; UNCED, WSSD) festgelegt worden sind.

Allerdings sind nicht notwendigerweise alle Verluste biologischer Vielfalt für Menschen intolerabel – einige wiegen schwerer als andere. Der Wert ökosystemarer Güter und Dienstleistungen und ihre Bedeutung für den Naturschutz soll hier nicht im Detail beschrieben werden, da diese Themen vom Beirat bereits in einem früheren Gutachten ausführlich behandelt wurden (WBGU, 2000).

Auf Grundlage früherer Arbeiten des WBGU und einer Auswertung des wissenschaftlichen Sachstands kommt der Beirat zu den folgenden Aussagen:

1. Klimabedingte Verschiebungen von mehr als 20–30% der Fläche jedes großskaligen Ökosystemtyps oder Bioms werden als gefährlich im Sinne des Artikels 2 UNFCCC eingestuft. Ein derart großer Verlust würde ein erheblich gesteigertes Risiko für die Ökosysteme bedeuten und vor allem wegen der mangelnden Anpassungsfähig-

keit zu suboptimalem Funktionieren dieser Ökosysteme führen (Leemans und Eickhout, 2003). Viele Biome haben aufgrund von Landnutzungsänderungen bereits große Verluste und Degradation hinnehmen müssen, so dass zusätzliche Klimawirkungen um so schwerer wiegen.

2. Verluste von Gebieten mit hohem Schutzwert sollten vermieden werden. Die Hotspots biologischer Vielfalt (Myers, 1988; Mittermeier et al., 1999; Myers et al., 2000) sind von besonderer Bedeutung, da ein erheblicher Anteil der Arten in diesen 25 Gebieten konzentriert ist, die insgesamt nur 1,4% der weltweiten Landfläche ausmachen. Der Beirat stellt fest, dass diese Hotspots und andere wichtige Gebiete wie z. B. Feuchtgebiete von internationaler Bedeutung (Ramsar-Konvention), Welterbegebiete (Welterbekonvention der UNESCO), tropische Wildnisgebiete mit geringer menschlicher Bevölkerungsdichte (Mittermeier et al., 2003) oder Zentren der Agrarbioidiversität (Hammer, 1998) biologische Vielfalt beherbergen, die von höchstem Schutzwert sind. Sie sollten nicht nur vor weiterer Habitatzerstörung und -fragmentierung geschützt werden, sondern auch vor klimabedingten Verlusten. Dies ist umso wichtiger, weil die Bevölkerung in den Hotspots überdurchschnittlich wächst (Cincotta et al., 2000) und die Ökosystemzerstörung durch Landnutzungsänderung ungehindert fortzuschreiten scheint.

Es ist eine komplexe und schwierige Aufgabe, diese beiden Prämissen in Angaben von noch tolerablen globalen Mitteltemperaturen umzuwandeln. Der Kenntnisstand auf Grund der heute verfügbaren Fallstudien lässt eine direkte quantitative Ableitung von tolerablen Temperaturgrenzen nicht zu. Daher muss sich der Beirat auf Experteneinschätzungen verlassen, die sich auf die Begutachtung der wissenschaftlichen Literatur gründen (z. B. IPCC, 2001b; Hare, 2003). Ein solche Experteneinschätzung wurde auf einer kürzlich in Großbritannien abgehaltenen internationalen Konferenz zu diesem Thema entwickelt: Es bestand Konsens, dass der Klimawandel auf +2°C begrenzt werden muss (Green et al., 2003).

Der Beirat zieht den Schluss, dass schon geringe Klimaveränderungen signifikante Wirkungen auf Ökosysteme nach sich ziehen können. Das Risiko für mehrere weltweit bedeutende Ökosysteme scheint oberhalb von 2°C globaler Mitteltemperatur erheblich anzusteigen (Abb. 2.1-1). Eine Erwärmung um mehr als 2°C birgt die Gefahr, dass sich klimabedingt mehr als die genannten 20–30% der Biomflächen verschieben. Auch die Untersuchung anderer Fallstudien legt nahe, dass jenseits dieses Bereichs schwer wiegende Wirkungen zu erwarten sind (Hare, 2003). Hinsichtlich der Wirkungen auf Ökosysteme und biologische Vielfalt hält der Beirat eine Erwärmung

der globalen Mitteltemperatur von mehr als 2°C für nicht tolerabel.

2.1.3

Auswirkungen des Klimawandels auf Nahrungsmittelproduktion und Wasserverfügbarkeit

2.1.3.1

Nahrungsmittelproduktion und Klimawandel

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Nahrungsmittelproduktion und Landwirtschaft hängen von einer Reihe von Faktoren ab, u. a. der Vulnerabilität der regionalen landwirtschaftlichen Systeme, der Bevölkerung und ihrer jeweiligen Anpassungsfähigkeit. Die Reaktion landwirtschaftlicher Systeme auf Klimaveränderungen wird u. a. bestimmt durch Temperatur, Niederschlag, CO₂-Düngeeffekt und sozioökonomische Rahmenbedingungen wie Marktzugang, Technologie oder die Verfügbarkeit von Ressourcen, die für die Anpassung notwendig sind (IPCC, 2001b). In den mittleren Breiten kann eine moderate Zunahme der regionalen Temperatur die Nahrungsmittelproduktion steigern, solange die Wasserverfügbarkeit nicht gefährdet wird. In den Tropen dagegen sind die Pflanzen oft nahe am Temperaturoptimum, so dass eine regionale Erwärmung Produktionseinbußen zur Folge haben kann. Extreme Wetterereignisse werden wahrscheinlich die Nahrungsmittelproduktion erheblich mindern, entweder direkt oder über die Zunahme von Schädlingen bzw. Krankheiten (Iglesias et al., 2001; Rosenzweig et al., 2002). Die meisten Studien ziehen aber diese Interaktionen der Nahrungsmittelproduktion mit Dürren, heftigen Niederschlägen, Hagel oder Schädlingsbefall nicht in Betracht und neigen so dazu, die Schäden zu unterschätzen. Speziell gezüchtete genmanipulierte Sorten könnten ein Weg sein, die Anpassungsfähigkeit der Landwirtschaft zu steigern; dieser Weg ist aber mit erheblichen Risiken behaftet (WBGU, 1999a; The Royal Society, 2002).

2.1.3.2

Toleranzgrenzen für Wirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion

Artikel 2 UNFCCC verlangt, dass „die Nahrungsmittelherzeugung nicht bedroht wird“. Bei der Beurteilung der Klimawirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion muss die Anpassungsfähigkeit der landwirtschaftlichen Systeme in Betracht gezogen werden, die sich zwischen Regionen erheblich unter-

scheidet. Unglücklicherweise sind die am stärksten betroffenen Regionen auch die mit der geringsten Anpassungsfähigkeit, also vor allem die Entwicklungsländer (IPCC, 2001b).

Bis zu einem gewissen Umfang können klimabedingte regionale Disparitäten von Ernteerträgen durch Handel und Transport von Nahrungsmitteln ausgeglichen werden. Allerdings ist zweifelhaft, ob der Agrarmarkt ohne weiteres die notwendige Kompensation leisten kann, da die meisten betroffenen Regionen bislang nicht in den Weltmarkt integriert sind. Daher beeinflussen sowohl die internationale Handelspolitik als auch der Grad der internationalen Kooperation (z. B. Entwicklungszusammenarbeit, landwirtschaftliche Forschungspolitik) die Grenze, ab der die Klimawirkungen als gefährlich zu bezeichnen sind.

Der IPCC hält es für wahrscheinlich, dass die Klimateffekte in vielen Entwicklungsländern (z. B. Indien) zu Nettoverlusten an landwirtschaftlichen Gütern und Wasserressourcen führen werden, wobei einige Regionen besonders verwundbar sind (IPCC, 2001b). Im Gegensatz dazu kann die Landwirtschaft in vielen entwickelten Ländern in mittleren und hohen Breiten von einer Erwärmung der globalen Mitteltemperatur unterhalb von 2°C profitieren. Die vorliegenden Modelle legen nahe, dass die globale Produktion bis zu einem Anstieg von 2°C oder sogar 3°C nicht gefährdet wäre. Allerdings werden die globalen Disparitäten zunehmen, da die Industrieländer auf der Gewinner- und die Entwicklungsländer auf der Verliererseite stehen werden. Bereits bei geringer Erwärmung wird erwartet, dass eine große Gruppe armer, hoch verwundbarer Entwicklungsländer zunehmend unter einem Mangel an Nahrungsmitteln leiden wird. Tab. 2.1-1 fasst die Ergebnisse von Studien zum Zusammenhang von Klimawandel und Nahrungsmittelproduktion zusammen.

Oberhalb einer globalen Erwärmung von 2–3°C ist mit Nettoverlusten der Nahrungsmittelproduktion im globalen Maßstab zu rechnen. In diesem Temperaturbereich könnte die Anzahl der Menschen, die durch den Klimawandel zusätzlich durch Hunger gefährdet sind, auf über 50 Mio. steigen (Parry et al., 2001). Modellprojektionen zeigen, dass bei einer Erwärmung von 3°C die Getreideproduktion ab 2080 im weltweiten Maßstab zu sinken beginnt, obwohl die Ernte selbst dann bei entsprechender Verteilung theoretisch noch den Bedarf decken könnte (Fischer et al., 2002a). Der Beirat weist darauf hin, dass diese Modellergebnisse noch erhebliche Unsicherheiten aufweisen.

Der WBGU stellt fest, dass eine Situation, in der alle Regionen klimabedingt signifikante Ernteverluste erleiden, eindeutig als nichtnachhaltig bezeichnet werden muss. Die Bedrohung von immer mehr Men-

Tabelle 2.1-1

Globale Erwärmung und ihre Wirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion in Industrieländern und Entwicklungsländern. Die Sterne bezeichnen Konfidenzniveaus (falls in der Literatur angegeben): *** hoch (67–95%), ** mittel (33–67%), * gering bis mittel (5–33%). GMT globale Mitteltemperatur oberhalb des vorindustriellen Niveaus. Quelle: # IPCC, 1990; § Parry et al., 1999; + Fischer et al., 2001a

| Zunahme der GMT [°C] | Wirkungen | |
|----------------------|---|--|
| | Entwicklungsländer | Industrieländer |
| 1,0-1,7# | Getreideerträge nehmen in den meisten tropischen und subtropischen Regionen ab (* bis **). Reduzierte Frostschäden für einige Feldfrüchte (***). Gestiegene Schäden durch Hitzebelastung für einige Feldfrüchte und Herden (***). | Getreideerträge steigen in vielen Regionen der mittleren und hohen Breiten an (* bis **). Reduzierte Frostschäden für einige Feldfrüchte (***). Gestiegene Schäden durch Hitzebelastung für einige Feldfrüchte und Herden (***). |
| 1,4-3,2# | Stärkere Abnahmen der Getreideerträge in tropischen und subtropischen Regionen (* bis **); gemischte Auswirkungen auf Getreideerträge in den höheren und mittleren Breiten (* bis **). | Gemischte Auswirkungen auf Getreideerträge in den höheren und mittleren Breiten (* bis **). |
| 1,5-2,0# | Verdienste der einkommensschwachen Landwirte in Entwicklungsländern nehmen ab (* bis **). | |
| 1,6-2,6# | | Nach anfänglicher Steigerung beginnen die australischen Ernterträge zu schrumpfen. |
| >2,0# | Starke Abnahme der Erträge von Mais und Zuckerrohr in kleinen Inselstaaten. | Die europäische landwirtschaftliche Produktion nimmt zu (Ausnahmen: Portugal, Spanien und Ukraine). Nach anfänglichen Gewinnen nimmt die US-Landwirtschaft Verluste hin. |
| >2-2,5§ | Ernterträge in Entwicklungsländern zeigen Verluste. | |
| >3+ | Produktionsverluste in Entwicklungsländern. Eine Gruppe von 65 Ländern verliert 16% des landwirtschaftlichen BIP; Afrika und Indien gehören zu den Verlierern, China zu den Gewinnern. | |
| >2,0-6,4# | Generelle Minderung der Getreideerträge in den meisten Regionen mittlerer Breite (* bis **). Nahrungsmittelpreise steigen (* bis **). | Generelle Minderung der Getreideerträge in den meisten Regionen mittlerer Breite (* bis **). Nahrungsmittelpreise steigen (* bis **). |
| >2,6# | In Asien beginnen Nettoverluste bei der Reisproduktion. | |
| >4,2# | | Ganze Regionen in Australien fallen aus der landwirtschaftlichen Produktion heraus. |

schen durch den Klimawandel würde die Anstrengungen zur Erreichung der Jahrtausend-Entwicklungsziele (Millennium Development Goals) konterkarieren, wonach die Anzahl der Unterernährten bis 2015 zu halbieren ist mit dem Endziel, den Hunger ganz zu beseitigen.

Der Beirat zieht den Schluß, dass eine Klimaerwärmung oberhalb von ca. 2°C für die Nahrungsmittelproduktion einen gefährlichen Bereich darstellt,

sowohl in Bezug auf die globale Netto-Nahrungsproduktion als auch in Bezug auf die zunehmenden internationalen Disparitäten. Diese Experteneinschätzung berücksichtigt bereits die regional akkumulierten Effekte, mögliche negative Rückkopplungen zwischen Klimawandel und Landdegradation sowie die in den Modellläufen nicht abgebildeten Effekte von Extremwetterereignissen.

2.1.3.3 Toleranzgrenzen für Wirkungen auf die Wasserverfügbarkeit

Wasser ist der wichtigste begrenzende Faktor der Nahrungsmittelproduktion. Daher beziehen Modelle zur Abschätzung der künftigen Nahrungsproduktion die Klimateffekte sowohl in Hinsicht auf die Temperaturänderung als auch auf die Wasserverfügbarkeit ein. Gleichzeitig ist Wasser selbst das wichtigste Lebensmittel überhaupt. 1.100 Mio. Menschen haben heute keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser (UNEP, 2003) und verunreinigtes Wasser verursacht jedes Jahr 5 Mio. Todesopfer. Ein Drittel der Weltbevölkerung lebt unter „Wasserstress“, also in Ländern, in denen mehr als 20% der erneuerbaren Wasserressourcen genutzt werden. Diese Zahl wird in den nächsten Jahrzehnten voraussichtlich bis auf zwei Drittel steigen (IPCC, 2001b). Daher ist eine sichere Wasserversorgung bereits ohne den zusätzlichen Druck des Klimawandels eines der drängendsten Themen in den Entwicklungsländern (WBGU, 1997).

Zwar nimmt bei mittlerer globaler Erwärmung die gesamte Niederschlagsmenge zu, aber dies führt nicht direkt zu einer verbesserten Wasserverfügbarkeit. Hierfür ist nicht die Regenmenge entscheidend, sondern die Bodenfeuchte und die Neubildung von Grundwasser. Bei erhöhten Temperaturen muss es mehr regnen, um den Status Quo halten zu können, weil durch erhöhte Verdunstung die zusätzliche Niederschlagsmenge nicht in der Region genutzt werden kann. Nur in Regionen mit stark überdurchschnittlicher Niederschlagszunahme kann daher Wasserknappheit verringert werden. Zusätzlich fällt in vielen Regionen bei Erwärmung pro Regenereignis mehr Niederschlag, so dass wegen rascheren Abflusses häufig ein geringerer Anteil des Niederschlags

zur Erhöhung von Bodenfeuchte und zur Grundwasserneubildung beiträgt.

Nach Klimamodellanalysen steigt daher in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts die Anzahl der von Wasserknappheit bedrohten Menschen mit der steigenden Temperatur stark an, wobei die Wirkungen in ariden und semi-ariden Gebieten erheblich größer sein werden als die globalen Durchschnittsrechnungen vermuten lassen (IPCC, 2001b; Parry et al., 2001). In Regionen, die heute bereits unter Wasserstress leiden, werden sich also die Probleme durch den Klimawandel weiter verschärfen. In vielen Regionen unter Wasserstress schrumpfen bei einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur um mehr als 1,5°C Wasserangebot und -qualität, während Dürren und Überflutungen zunehmen (Tab. 2.1-2; IPCC, 2001b).

Die Modelle prognostizieren, dass im Jahr 2050 zusätzliche 500–3.000 Mio. Menschen unter Wasserstress leiden werden, wobei die meisten Schätzwerte zwischen 1.000–2.000 Mio. liegen. Im Bereich von 1,5–2°C scheint eine systemische Schwelle zu liegen: Wird diese überschritten, steigt die Anzahl der von Wasserknappheit zusätzlich betroffenen Menschen von 600 Mio. auf über 2.000 Mio. an, weil dann die Megastädte in asiatischen Entwicklungsländern erheblich in Mitleidenschaft gezogen werden (Parry et al., 2001). Eine so starke Zunahme an Menschen unter Wasserstress in einer solch kurzen Zeitspanne wird aller Voraussicht nach die verfügbaren Anpassungsmechanismen wie Meerwasserentsalzung oder Langstreckentransport überfordern und kann somit nicht als tolerabel bezeichnet werden. Der Beirat zieht den Schluss, dass eine Klimaänderung oberhalb von 1,5–2°C globaler Mitteltemperatur die Wasserverfügbarkeit so verschlechtern würde, dass sie als gefährlich einzustufen wäre.

| Zunahme der GMT [°C] | Wirkungen |
|----------------------|--|
| 1,0–1,7 | Die Wasserqualität degradiert durch höhere Temperaturen (**). Zunehmender Salzwassereinstrom in Küstenaquifere (**). Die Wassernachfrage für Bewässerung wird auf den Klimawandel reagieren; höhere Temperaturen werden die Nachfrage steigern (***). Zunahme der Überflutungsschäden durch intensivere Niederschlagsereignisse (**). Zunehmende Häufigkeit von Dürren (***). Spitzenabflusswerte in Flüssen verschieben sich in Richtung Winter in den Einzugsgebieten, in denen Schneefall eine wichtige Wasserquelle ist (***). |
| 1,2–3,2 | Die Wasserqualität degradiert durch höhere Temperaturen (***). Die Veränderung der Wasserqualität wird beeinflusst durch die Veränderungen des Abflussregimes (***). Die Effekte der Wassernachfrage verstärken sich (***). |
| >2,0 | Effekte auf Wasserangebot, -nachfrage und -qualität verstärkt (***). |

Tabelle 2.1-2
Klimawirkungen auf Wasserressourcen. Wirkungen sind unter der Annahme zu erwarten, dass keine Klimapolitik umgesetzt wird. Die Sterne bezeichnen Konfidenzniveaus: *** hoch (67–95%), ** mittel (33–67%). GMT globale Mitteltemperatur oberhalb des vorindustriellen Niveaus. Quelle: verändert nach IPCC, 1990

2.1.4

Auswirkungen des Klimawandels auf die wirtschaftliche Entwicklung

2.1.4.1

Wirtschaftliche Entwicklung und Klimawandel

Im Artikel 2 UNFCCC ist festgelegt, dass die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen innerhalb einer Frist erfolgen sollte, welche eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung ermöglicht. Dies impliziert, dass die Kosten von Stabilisierungsmaßnahmen nicht größer als der kurz-, mittel- und langfristig zu erwartende Nutzen sein dürfen. Dabei ist zu beachten, dass der Nutzen von Klimaschutzmaßnahmen in der Vermeidung von Klimaschäden und damit in der Vermeidung von Kosten bei unverändert hohen Emissionen besteht. Somit sind also zwei Kostenarten einander gegenüberzustellen: Kosten, die entstehen, wenn man Emissionen reduziert und Kosten, die entstehen, wenn man Emissionen nicht reduziert. Die Kosten des Klimawandels an sich, die im Fall fehlender Emissionsreduktion anfallen, sind dabei in Schadenskosten und Kosten für Anpassungsmaßnahmen zu unterscheiden (WBGU, 2002).

Der Beirat betrachtet hier ausschließlich die zweite Kostenart, da diese für die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf die wirtschaftliche Entwicklung relevant ist. Die Kosten der Emissionsminderung werden in Kapitel 3 betrachtet. Dort werden sie mit den geschätzten Kosten des Klimawandels und der Anpassung an den Klimawandel verglichen. Auch der zusätzliche Nutzen durch Emissionsminderung, der durch vermiedene nicht klimarelevante Schäden (beispielsweise Luftverschmutzung) entsteht, wird dort berücksichtigt.

Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Schätzungen der aggregierten monetarisierten Auswirkungen des Klimawandels. Diese betreffen hauptsächlich Sektoren, die schon in den vorangegangenen Abschnitten behandelt wurden (wie z. B. Landwirtschaft). Des Weiteren sind beispielsweise Auswirkungen auf menschliche Siedlungen und die Infrastruktur für solche aggregierten Schätzwerte relevant. Hierbei geht es vor allem um die sozioökonomischen Auswirkungen des steigenden Meeresspiegels. Diese beinhalten den unmittelbaren Verlust von ökonomischen, ökologischen und kulturellen Werten durch den Verlust an Land, Infrastruktur und Küstenökosystemen. Außerdem zählen dazu das erhöhte Überschwemmungsrisiko und andere Auswirkungen, die durch Veränderung im Wassermanagement, beim Salzgehalt und biologischer Aktivitäten auftreten (IPCC, 2001b). Ein großer Teil der

Weltbevölkerung lebt heute in Küstengebieten und die Bevölkerungswachstumsrate in diesen Gebieten ist überdurchschnittlich. Auch liegen viele große Städte in Küstennähe. Nicholls et al. (1999) zeigen, dass in den 2080er Jahren die Anzahl der Menschen, die durchschnittlich in einem Jahr potenziell durch eine Sturmflut betroffen sein werden, fünfmal höher sein wird als heute, wenn man einen Anstieg des Meeresspiegels um 0,38 m unterstellt. Selbst wenn man annimmt, dass zunehmend Schutzmaßnahmen ergriffen werden, könnten zwischen 13 und 88 Mio. Menschen betroffen sein.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf natürliche Systeme wie Feuchtgebiete und Korallenriffe können wiederum beträchtliche Folgewirkungen auf sozioökonomische Systeme entfalten (IPCC, 2001b). Beispielsweise kann das starke Bleichen von Korallenriffen mit hohen Sterberaten, wie es 1998 im Indischen Ozean beobachtet wurde, zu Verlusten im Fischfang und dauerhaften negativen Effekten auf den Tourismus führen. Die Degradierung der Riffe führt auch zu einem verringertem natürlichen Schutz der Küsteninfrastruktur gegen hohe Wellen und Sturmfluten. Wilkinson et al. (1999) schätzen die Kosten des Bleichens der Korallen im Jahr 1998 für die nächsten 20 Jahre auf 706–8.190 Mio. US\$.

Die aggregierten Auswirkungen des Klimawandels werden normalerweise als Veränderungen des Bruttoinlandsprodukts (BIP) gemessen. Ihr Ausmaß ist aufgrund von methodologischen Problemen der Monetarisierung und regionaler sowie zeitlicher Aggregation von Schäden sehr unsicher. Auswirkungen der Veränderung von Klimavariabilität und -extremen sowie die Möglichkeit singulärer Klimaänderungen werden grundsätzlich nicht betrachtet (Kap. 2.1.6). Auswirkungen auf Güter und Dienstleistungen, die nicht auf Märkten gehandelt werden, werden nur partiell berücksichtigt. Diese nicht über Märkte bewertbaren Schäden sind vermutlich sehr hoch, jedoch schwer zu quantifizieren. Daher werden die ökonomischen Verluste grundsätzlich unter- und die Gewinne überbewertet. Zusätzlich reagieren die Schätzungen der Auswirkungen sehr sensibel auf Annahmen wie Ungleichheits- und Risikoaversion (IPCC, 2001c).

Die quantitative Bewertung des Nutzens und der Kosten von Anpassungsmaßnahmen ist bislang unvollständig. Je stärker und schneller der Klimawandel voran schreitet, desto größer sind die Herausforderungen für eine Anpassung. Studien zeigen, dass der Nutzen von Anpassungsmaßnahmen, wie Küstenschutz, potenziell sehr hoch ist. Allerdings legen diese Studien willkürliche Annahmen bezüglich der Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse zugrunde und können daher den möglichen Nutzen nicht hinreichend sicher einschätzen. Vernachlässigt

werden zudem Veränderungen von Klimaextremen und der Klimavariabilität sowie unvollkommene Voraussicht (IPCC, 2001c).

Modellberechnungen zeigen, dass bei einer Erwärmung von 1°C eine signifikante Anzahl von Entwicklungsländern voraussichtlich insgesamt Verluste erleiden, während in entwickelten Ländern sowohl Schäden als auch Nutzen auftreten werden. Einige Modelle prognostizieren dieser Ländergruppe sogar einen Nettotonnen aus der Erwärmung (IPCC, 2001c). Nach der projizierten Verteilung der ökonomischen Auswirkungen werden sich die Wohlfahrtsdisparitäten sowohl in Entwicklungs- als auch in Industrieländern erhöhen. Dabei wachsen die Disparitäten mit einer stärkeren Erwärmung, wobei die Entwicklungsländer und die in Armut lebenden Menschen weltweit am stärksten betroffen sein werden (IPCC, 2001b). IPCC (2001b) bewertet die Ergebnisse von verschiedenen Modellierungsstudien über aggregierte Schadenskosten. Entwicklungsländer sind demnach gegenüber dem Klimawandel verwundbarer als entwickelte Länder. Für einige Länder oder Regionen, wie Indien und Afrika, aber auch die EU, werden bei einer Erwärmung von ungefähr 2,5°C gegenüber dem vorindustriellen Wert mit Verlusten zwischen 2 und 5% des BIP gerechnet.

Diese numerischen Ergebnisse bleiben allerdings spekulativ. Die Ergebnisse sind schwer zu vergleichen, da in den Studien unterschiedliche Annahmen getroffen werden. Wenige Schätzungen berücksichtigen, dass singuläre Ereignisse katastrophale Folgen nach sich ziehen könnten. Einige Studien zeigen eine schnelle Zunahme von Schäden mit steigender Temperatur, andere treffen optimistische Annahmen über die Anpassungsfähigkeit und die Referenzentwicklung, wodurch die Schätzung der Schadenshöhe geringer ausfällt (IPCC, 2001b). Grundsätzlich sind die geschätzten aggregierten Auswirkungen um so größer, je höher Verteilungsfragen gewichtet werden, da Verluste der Armen nicht durch gleich hohe Gewinne der Reichen kompensiert werden können.

2.1.4.2 Toleranzgrenzen für Wirkungen auf die wirtschaftliche Entwicklung

Soll eine Toleranzgrenze für eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung festgelegt werden, müssen die unterschiedlichen Auswirkungen sowohl innerhalb und zwischen Regionen als auch über die Zeit analysiert und bewertet werden. In einem früheren Gutachten hat der WBGU (1997) eine normative Obergrenze vorgeschlagen, die alle Schadens- und Anpassungskosten über 5% des BIP als intolerabel einstuft (Kap. 2.1.1). Diese sehr grobe Schätzung

basierte auf den Erfahrungen mit der deutschen Wiedervereinigung, aus denen viele Ökonomen ableiteten, dass Kosten in einer Größenordnung von mehr als 3–5% des BIP kritisch für eine Volkswirtschaft sind. Der WBGU folgerte, dass eine Erwärmungsrate von mehr als 0,2°C pro Jahrzehnt nicht tolerabel ist, weil dadurch die obere Grenze für Schadens- und Anpassungskosten von 5% des globalen BIP erreicht würde, wenn man extreme Wetterereignisse und die Synergien mit anderen Umweltproblemen berücksichtigt.

Alternativ kann die Leitplanke auch auf der Anzahl an Menschen basieren, die durch die Klimaveränderungen ökonomisch betroffen sind. Berechnungen kommen zu dem Ergebnis, dass die Mehrzahl der Menschen bereits bei einer durchschnittlichen globalen Erwärmung von 1,5–2,5°C über dem vorindustriellen Niveau negativ betroffen sein könnte (IPCC, 2001b).

Unter Berücksichtigung der hohen Unsicherheit bei den Schadensschätzungen setzt der WBGU keine quantitative Toleranzgrenze für die wirtschaftliche Entwicklung, sondern nutzt lediglich die normative 3–5% BIP-Schwelle als vorläufigen Maßstab bei der Bewertung. Aus der Tatsache, dass eine hohe Unsicherheit bei der Schätzung von Schadenskosten besteht und die Schäden sehr wahrscheinlich unterbewertet werden, wenn nur Marktbewertungen zugelassen werden, schließt der WBGU, dass sich bereits bei einer 2°C höheren globalen Durchschnittstemperatur gegenüber dem vorindustriellen Niveau große Regionen vermutlich nicht tolerablen Belastungen ihrer Volkswirtschaft gegenüber sehen (3–5% des BIP).

2.1.5 Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit

2.1.5.1 Menschliche Gesundheit und Klimawandel

Gesundheit stellt in dreifacher Hinsicht eine Besonderheit in der Diskussion des Klimawandels dar:

1. Gesundheit ist weltweit als schützenswertes Gut von allen Kulturen, Religionen, Staaten und gesellschaftlichen Gruppen anerkannt.
2. Gesundheit wird von allen Antrieben des globalen Umweltwandels beeinflusst (universale Sensitivität).
3. Der Gesundheitszustand einer Bevölkerung kann als Indikator für die Auswirkungen des Klimawandels genutzt werden (Krafft et al., 2002), etwa vergleichbar der zentralen Rolle der Gesundheit

im Index der menschlichen Entwicklung (Human Development Index – HDI).

Nach einer neuen Analyse der Weltgesundheitsorganisation verursacht der Klimawandel heute bereits jährlich 150.000 Todesopfer. Campbell-Lendrum et al. (2003) schätzten die gegenwärtige Gesundheitswirkung des Klimawandels (2000, verglichen mit dem Basisszenario der Jahre 1961–90). Sie konzentrierten sich auf vier Krankheiten: Malaria, Unterernährung, Durchfall sowie Unfälle durch Überschwemmungen. Die Schätzungen beliefen sich auf eine jährliche Gesundheitswirkung von 5,5 Mio. DALYs. DALYs (Disability-Adjusted Life Years) stellen den Verlust von gesunden bzw. produktiven Lebensjahren dar (WHO, 2002). Dieses Summenmaß wurde entwickelt, um die gesamte Krankheitslast einer Bevölkerung (frühzeitiger Tod, Krankheit und Behinderung) zu erfassen (Murray, 1994). Dabei zeigten sich drastische regionale Unterschiede (Abb. 2.1-2), wobei die größte Gesundheitsbürde in denjenigen Regionen auftritt, die die größte Vulnerabilität und das größte Bevölkerungswachstum aufweisen: Afrika südlich der Sahara sowie Südasien.

Wenn man die Gesundheitsschäden aufschlüsselt, welche durch den Klimawandel angestoßen werden, so lassen sich direkte und indirekte Gesundheitswirkungen des Klimawandels unterscheiden (WHO 2000; IPCC 2001b).

Zu den direkten Auswirkungen zählen z. B. die Effekte von extremen Wetterereignissen (z. B. Herz-Kreislaufkrankungen, Asthma) oder wetterbedingten Katastrophen (z. B. Überschwemmungen an der Küste oder im Inland, Erdbeben). Letztere führen nicht nur direkt zu Unfällen, sondern schädigen die Infrastruktur der Gesundheitsversorgung, die in den meisten Entwicklungs- und Teilen der

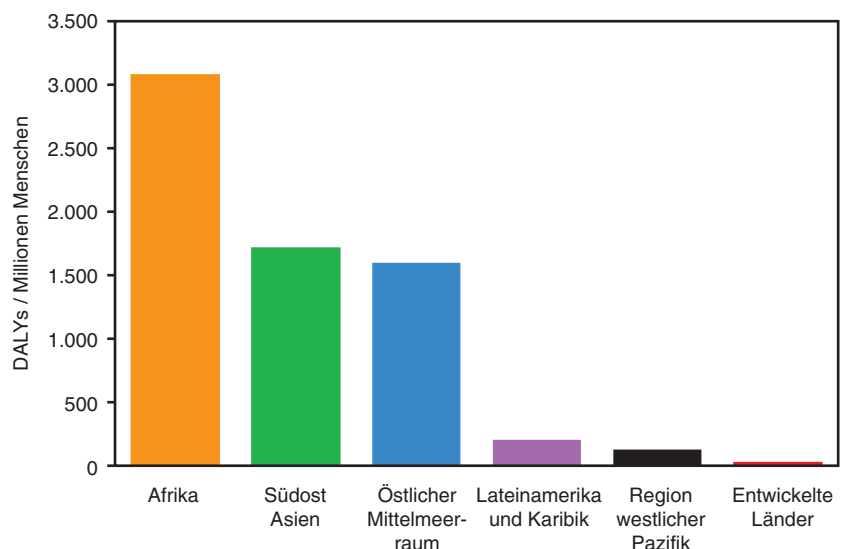
Schwellenländer ohnehin bereits unzureichend ist. Damit wird ein entscheidendes Element der Anpassungsfähigkeit geschwächt. Selbst in Industrieländern können Hitzewellen bei mangelnder Anpassung (z. B. Klimaanlage) schwere Gesundheitsschäden verursachen. Die französische Regierung geht von 11.435 zusätzlichen Todesfällen aus, die der Sommerhitze 2003 zuzuschreiben gewesen seien (Neue Züricher Zeitung vom 30.8.2003).

Die größten Gesundheitsschäden entstehen jedoch durch indirekte Auswirkungen, wie im Fall der durch Vektoren (z. B. Mücken, Zecken, Fliegen) übertragenen Infektionskrankheiten. Der IPCC geht davon aus, dass bis zum Jahr 2080 260–320 Mio. Menschen zusätzlich der Malaria ausgesetzt sein werden (IPCC, 2001b). Dem steht gegenüber, dass in anderen Regionen die Malariaexposition durch den Klimawandel zurückgehen könnte. Diese Effekte können aber nicht direkt miteinander verglichen werden. Wenn Malaria in neue Gebiete einwandert, kann sie zu sehr schweren Epidemien führen, da die Bevölkerung immunologisch ungeschützt ist. Auf der anderen Seite ist der Gesundheitsgewinn durch Verschwinden der Malaria aus bislang belasteten Gebieten vergleichsweise gering (Trape und Rogier, 1996). Auch Dengue-Fieber oder die durch Zecken übertragene Hirnhautentzündung sind vektorübertragene Infektionskrankheiten, die vom Klimawandel beeinflusst werden können. Die Quantifizierung der Klimawirkungen auf Infektionskrankheiten stellt eine Herausforderung für die Forschung dar.

Wo Ernährungssicherheit oder Wasserversorgung bereits heute gefährdet sind, muss damit gerechnet werden, dass kombinierte Effekte (von z. B. regionaler Temperaturerhöhung, Süßwasserverknappung und Versalzung der Böden durch Meeresspiegelan-

Abbildung 2.1-2:

Geschätzte Einwirkung des Klimawandels auf die Gesundheit (1990–2000), nach Regionen. Berechnung für vier Krankheiten: Malaria, Unterernährung, Durchfall und Unfälle durch Überschwemmungen. DALYs sind ein Summenmaß für die Krankheitsbürde (siehe Text).
Quelle: Campbell-Lendrum et al., 2003



stieg) zu Ernteausfällen und – bei unzureichender Anpassung – zu Unterernährung bzw. vermehrtem Wasserstress besonders vulnerabler Bevölkerungsgruppen (z. B. Kinder, Frauen, Arme) führen wird (Kap. 2.1.3.1; WHO, 2000).

Dabei ist die Annahme plausibel, dass die Gesundheitseffekte von Nahrungsmangel, Trinkwasserknappheit, Malariaausbreitung und Flutkatastrophen synergistisch wirken. Eine Quantifizierung der Wechselwirkung ist zur Zeit noch nicht möglich, aber aus den von Parry et al. (1999) geschätzten Temperatursensitivitäten der Bevölkerung lässt sich erkennen, dass zwischen 1°C und 1,8°C Temperaturerhöhung die klimabedingt zusätzlich unter Wassermangel leidende Bevölkerung drastisch zunimmt (Kap. 2.1.3.3).

Wassermangel lässt weniger Raum für persönliche Hygiene, weshalb mit einem deutlichen Anstieg der Durchfallerkrankungen gerechnet werden muss. Diese Schwellencharakteristik verstärkt den kontinuierlichen Anstieg der Durchfallerkrankungen mit der Erwärmung. Der Anstieg dieser Erkrankungen wird auf 3–8% pro Grad Temperaturanstieg geschätzt (Checkley et al., 2000; Singh et al., 2001; WHO et al., 2003).

2.1.5.2 Toleranzgrenzen für Wirkungen auf die menschliche Gesundheit

Zusammenfassend kommt der WBGU zu dem Schluss:

- Die Klimawirkungen auf die menschliche Gesundheit sind erheblich und kumulativ.
- Die Wirkungen werden geografisch äußerst unterschiedlich ausfallen, wobei Afrika und Südasiens am stärksten betroffen sind, also Regionen mit überdurchschnittlichem Bevölkerungszuwachs und mangelnder Anpassungskapazität.
- Die bisher vorliegenden Schätzungen lassen das WBGU-Klimafenster mit maximal 2°C Erhöhung der globalen Mitteltemperatur eher als zu weit, keinesfalls jedoch als zu eng erscheinen.
- Allerdings lässt der derzeitige Kenntnisstand keine exakte Quantifizierung der künftigen, durch komplexe Beziehungsgeflechte vermittelten Wirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit zu (WHO et al., 2003).
- Der Beirat weist ausdrücklich darauf hin, dass vermehrte Forschungsanstrengungen (prospektive Datenreihen, Modellierung) notwendig sind, um die Beziehungsgeflechte zwischen globalen Umweltveränderungen und Gesundheit besser zu verstehen und zu quantifizieren. Der WBGU empfiehlt hierfür insbesondere die Anwendung

des DALY-Ansatzes (WHO, 2002; WHO et al., 2003) als Summenmaß für die Gesundheitswirkung.

2.1.6 Durch den Klimawandel angestoßene großräumige singuläre Ereignisse

2.1.6.1 Klimawandel und großräumige singuläre Ereignisse

Singuläre nicht lineare Ereignisse, die durch den Klimawandel angestoßen werden, stellen verheerende Risiken für die Menschen dar. Im komplexen planetarischen System sind verschiedene systemische Schwellenwerte möglich, jenseits derer großräumige singuläre Ereignisse ausgelöst werden könnten (Schellnhuber, 2002). Modellrechnungen ergeben, dass Systemumschwünge bei Temperaturänderungen eintreten können, wie sie für die kommenden Jahrhunderte bei weiter wachsenden Treibhausgaskonzentrationen erwartet werden (IPCC, 2001a). Das Überschreiten der Schwellenwerte kann zu unvorhersehbaren, auch irreversiblen Veränderungen führen. Als irreversibel bezeichnet der WBGU einen Vorgang, der innerhalb menschlicher Zeithorizonte (Jahrtausende) unumkehrbar ist, wie z. B. das Abschmelzen von Eisschilden oder der klimabedingte Meeresspiegelanstieg. Es ist sehr schwierig vorherzusagen, wann ein Schwellenwert erreicht wird. Wichtig ist aber die Aussage, dass die Wahrscheinlichkeit vieler singulärer Ereignisse mit der Veränderungsrate der Einflüsse steigen dürfte. Beginn, zeitlichen Verlauf und Größenordnung dieser Einzelereignisse zu berechnen, ist heute jedoch nicht möglich. Gewisse Unsicherheiten werden immer mit den Projektionen singulärer Klimaänderungen verbunden sein, weil die Vorhersagbarkeit nahe den Klimaschwellenwerten immer geringer wird (Alley et al., 2003).

Selbst wenn einige dieser Effekte erst in sehr ferner Zukunft eintreten sollten, könnten die Auswirkungen so plötzlich und verheerend sein, dass der Schaden sehr groß wird und eine Anpassung fast unmöglich ist (IPCC, 2001b). Der WBGU stellt daher fest, dass die im Folgenden beschriebenen großen Einzelereignisse auf jeden Fall verhindert werden müssen.

ZUSAMMENBRUCH DER THERMOHALINEN ZIRKULATION

Die thermohaline Zirkulation (THC) führt warmes tropisches Wasser in den Nordatlantik, erwärmt so

Nord- und Westeuropa um mehrere °C und verstärkt die Niederschläge in der ganzen Region. Die Kenntnisse über frühere Klimaveränderungen sowie Modellrechnungen weisen darauf hin, dass verschiedene Gleichgewichte für die thermohaline Zirkulation im Nordatlantik existieren. Eine Veränderung des Gleichgewichts kann durch Temperaturveränderungen oder durch Süßwasserzufluss angestoßen werden. Komplexe Zirkulationsmodelle ergeben, dass der zukünftige Klimawandel zu einer Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit oder sogar zu einem Zusammenbruch der THC führen kann.

Einige Studien schätzen den Zusammenbruch der THC jenseits einer globalen, mittleren Erwärmung von 4–5°C ein, bei nach wie vor großen Unsicherheiten (IPCC, 2001b). Stocker und Schmittner (1997) haben nachgewiesen, dass die THC nicht nur gegenüber der endgültigen Höhe der Erwärmung, sondern auch gegenüber der Erwärmungsrate empfindlich ist. Diese und andere Szenarios (z. B. Rahmsdorf und Ganopolski, 1999) kommen zu der Schlussfolgerung, dass eine ungeminderte globale Erwärmung noch Hunderte von Jahren später zu einem Zusammenbruch der THC führen kann. Dadurch würden kommenden Generationen unwiderruflich intolerable Lasten aufgebürdet. Es entstünden auch ernsthafte Konsequenzen für die marinen Ökosysteme und die Kohlenstoffaufnahme durch den Ozean.

„RUNAWAY“-TREIBHAUSEFFEKT

Der Klimawandel kann die Leistungsfähigkeit der heutigen Kohlenstoffsenke in Ozean und Biosphäre verringern. Unter bestimmten Bedingungen kann die Biosphäre sogar eine Quelle für Treibhausgas werden, wenn z. B. marine Lagerstätten für Methanhydrate destabilisiert werden, wodurch große Methanmengen in die Atmosphäre entweichen könnten. Dieser Prozess könnte eine positive Rückkopplung mit einer Beschleunigung der globalen Erwärmung auslösen. Die Freisetzung von Methan aus den gewaltigen Lagerstätten natürlicher Gashydrate im Ozean, den tiefen Seen und den polaren Sedimenten sowie der Gasvorkommen, die unter den Hydraten eingeschlossen sind, könnten die für geologische Zeiträume abrupte globale Erwärmung vor rund 55 Mio. Jahre erklären. Damals stiegen innerhalb weniger tausend Jahre die Temperaturen in einigen Regionen um bis zu 8°C (Schiermeier, 2003). Jüngere Modellrechnungen zeigen, dass die Erklärung im Umschalten der thermohalinen Zirkulation und der daraus folgenden Destabilisierung großer Mengen an Methanhydraten liegen kann (Bice und Marotzke, 2002; NRC, 2002). Die Umschaltung wurde durch eine langsame Verstärkung des hydrologischen Kreislaufs in der Atmosphäre verursacht, wie bei steigenden Temperaturen zu erwarten ist. Die

Abgabe großer Methanmengen kann auch bei der plötzlichen Beendigung der Vereisung am Ende der letzten Eiszeit eine wichtige Rolle gespielt haben. Noch immer gibt es große Hydratvorkommen in der Arktis und weltweit in den Schelfsedimenten, die ein begründetes Risiko für weitere Emissionen bilden (Nisbet, 2002).

DIE VERÄNDERUNG DER KONTINENTALEN MONSUNE

Der asiatische Sommermonsun ist ein großräumiges Zirkulationsmuster, das von der unterschiedlichen Erwärmung und Abkühlung zwischen Land und Ozean getrieben wird. Jedes Jahr klappt die vorherrschende Windrichtung um, über Indien z. B. von Nordost im Winter auf Südwest im Sommer. Der Sommermonsun führt zu hohen Niederschlägen, weil er viel Feuchtigkeit aus dem Indischen Ozean mit sich führt. Monsunregen machen 75–90% der jährlichen Regenfälle in Indien aus und sind für Landwirtschaft und Industrie in ganz Süd- und Ostasien entscheidend. Der Monsun korrespondiert mit der Wanderung der Innertropischen Konvergenzzone, einer Region niedrigen Luftdrucks, in der die Passatwinde konvergieren. Die Lage dieser Konvergenzzone wechselt im Sommer zwischen zwei bevorzugten Breiten: die eine verbunden mit starken Regenfällen über Indien (aktiver Monsun), die andere mit geringeren über Land (unterbrochener Monsun). Palaeoklimatische Forschungsergebnisse und die nicht lineare Natur des asiatischen Monsuns verdeutlichen das Risiko plötzlicher Systemwechsel in der Zukunft (Zickfeld, 2003).

Eine sehr hohe Korrelation der indischen Nahrungsmittelproduktion mit der Monsunregenmenge für die vergangenen Jahrzehnte unterstreicht die hohe Bedeutung des Sommermonsuns für die 1 Mrd. Menschen zählende Bevölkerung Indiens. Beispielsweise verhungerten 600.000 Menschen in Nordindien zwischen 1790–1796 in Folge eines sehr geringen Monsunregens und niedriger Bodenfeuchte. In dieser Region sind sehr schwache Sommermonsune in den vergangenen 600 Jahren keine unbekannteren Ereignisse. Obwohl die Auswirkungen von Dürren auf die Landwirtschaft durch Bewässerung gemildert werden können, ist dieses nur bei ausreichenden Wasserreserven, vor allem Grundwasser, möglich. Derartige Grundwasserpuffer werden aber den nächsten Zusammenbruch des Monsuns in Nordindien mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht ausgleichen können (Alverson et al., 2003). Obwohl es Indien gelungen ist, seit seiner Unabhängigkeit Dürrekatastrophen durch landesweite Nahrungsmittelverteilung zu verhindern, bedeutet eine systematische Veränderung des Sommermonsuns eine existenzielle Bedrohung für seine Bevölkerung.

Erhöhte Treibhausgaskonzentrationen könnten den asiatischen Sommermonsun verstärken (IPCC, 2001b). Dies wird teilweise durch die regional erhöhte anthropogene Lufttrübung vor allem von Sulfataerosolen kompensiert, wodurch das Land weniger stark aufgeheizt wird. Die Verstärkung des Monsuns könnte von höheren Schwankungen der Niederschläge begleitet sein. Dadurch könnten sowohl Perioden verringerter Monsunniederschläge als auch Perioden mit Intensivniederschlägen auftreten. Veränderungen im zeitlichen Ablauf, der Intensität sowie steigende Variabilität in einer Jahreszeit können zu schweren Beeinträchtigungen in der Nahrungsmittelproduktion sowie Überflutungen und Dürren in Asien führen. Der gegenwärtige Forschungsstand über den asiatischen Monsun unterscheidet sich von dem über die THC: Schwellenwerte konnten bisher nicht identifiziert werden.

ZERFALL DES WESTANTARKTISCHEN EISSCHILDS
Meereisschilde sind inhärent instabil, und das westantarktische Eisschild ist in den vergangenen 1,3 Mio. Jahren mindestens einmal zerfallen. Dies geschah möglicherweise bei Temperaturen, die nicht mehr als 2°C über den heutigen lagen (Oppenheimer, 1998). Die für das 21. Jahrhundert projizierte globale Erwärmung könnte das irreversible Schmelzen des westantarktischen Eisschilts anstoßen, mit der Folge eines Meeresspiegelanstiegs um 4–6 m und schwerster Schäden (IPCC, 2001b). Allerdings bestehen große Unsicherheiten über die Zeitskala des möglichen Zerfalls. Die Abschätzungen liegen zwischen 400–500 Jahren oder 1.600–2.400 Jahren, mit einem entsprechenden Beitrag von 10–15 mm bzw. 2,5 mm zum jährlichen Meeresspiegelanstieg (IPCC, 2001b). Der erste Wert führt zu einem Anstieg um 1–1,5 m in einem Jahrhundert und liegt jenseits jeglicher menschlicher Erfahrung. Er würde die Anpassungsfähigkeit der meisten Küstenstrukturen und -ökosysteme übersteigen (IPCC, 2001b).

GEFÄHRDUNG DES GRÖNLANDEISES

Das Schmelzen des Grönlandeises würde zu einem irreversiblen Anstieg des mittleren Meeresspiegels um einige Meter über viele Jahrtausende führen (IPCC, 2001a). Nach Modellrechnungen liegt die kritische (lokale) Temperaturerhöhung über Grönland hierfür bei etwa 3°C. Die lokale Erwärmung über Grönland ist aber um etwa einen Faktor 1,3–3,1 höher als die globale Erwärmung (IPCC, 2001a). Rechnet man beispielsweise mit einem Faktor 2, so könnte bereits eine globale Erwärmung um nur etwa 1,5°C zu einem irreversiblen Abschmelzen des gesamten Grönlandeises führen.

2.1.6.2

Toleranzgrenzen für großräumige singuläre Ereignisse

Aufgrund der großen Unsicherheit bei jeder quantitativen Abschätzung der Schwellenwerte im Klimasystem und der inhärenten Unvorhersagbarkeit nahe dieser Schwellenwerte muss der Vorsorgeansatz zum Leitprinzip für quantitative Leitplanken werden. Anpassung ist angesichts dieser singulären Klimaänderungen kaum möglich, und die Auswirkungen sind für große Regionen oder sogar global potenziell verheerend. Das Risiko, jeden der oben beschriebenen Schwellenwerte zu überschreiten, wächst mit der steigenden Erwärmung ebenso wie mit einer steigenden Erwärmungsrate. Der WBGU setzt daher einen Schwellenwert von 2°C für die globale Erwärmung im Vergleich zu vorindustriellen Werten und von 0,2°C als dekadische Anstiegsrate der Erwärmung an, um inakzeptable Risiken großer Einzelereignisse zu vermeiden (WBGU, 1995, 2003). Selbst innerhalb dieser Grenzwerte ist das Risiko nicht vernachlässigbar.

2.1.7

Fazit: Die WBGU-Klimaleitplanke der globalen Mitteltemperatur

Nach Untersuchung der Klimawirkungen des vom WBGU als primär angesehenen Parameters der globalen Mitteltemperatur bestätigt sich für den Beirat seine Auffassung früherer Berichte (WBGU, 1995, 1997), dass die global aggregierte Gefahrenschwelle bei einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur von mehr als 2°C über dem vorindustriellen Niveau beginnt. Als sekundäre Obergrenze sollte die globale, langfristig gemittelte Erwärmungsrate 0,2°C pro Jahrzehnt nicht übersteigen.

Selbst wenn dieses Klimafenster eingehalten werden kann, werden insbesondere in Entwicklungsländern bereits viele unerwünschte Konsequenzen eintreten. Zudem kann durch die getrennte Begutachtung der Kriterien keine Aussage darüber gemacht werden, wie diese Kriterien miteinander und mit anderen Faktoren globaler Umweltveränderungen (z. B. Bodendegradation) interagieren. Die Klimaerwärmung kann daher bereits bei geringeren globalen Mitteltemperaturen gefährliche Ausmaße erreichen.

2.1.8

Forschungsempfehlungen

Wegen der schwer wiegenden Folgen des Klimawandels sollten die Bedingungen für ihr Eintreten ver-

stärkt untersucht werden. Eine intensivere Forschung zu den Wirkungen von Klimaveränderungen auf Ökosysteme, Nahrungsmittelproduktion, Wasserversorgung, Gesundheit sowie die wirtschaftliche Entwicklung ist notwendig, um die noch bestehenden Unsicherheiten bei der Abschätzung weiter zu verringern. Die Zunahme an extremen Wetterereignissen ist dabei besonders zu berücksichtigen. Dabei sollten regionale Wirkungsstudien stärker den IPCC-Standards folgen und sich systematischer auf die vom IPCC (2000) entwickelten Szenarios beziehen. Durch internationale Kooperation sollte gewährleistet werden, dass alle relevanten Regionen untersucht werden. Insbesondere gilt es, die Kausalketten von globaler Mitteltemperatur zu lokalen Klimafaktoren besser zu verstehen.

Außerdem sollten die Potenziale und Risiken der Anpassung der Landwirtschaft an Klimawirkungen durch die Nutzung genetisch modifizierter Organismen erforscht werden. Die Anpassung an die Klimaänderung sollte zur Priorität der internationalen Agrarforschung werden.

Als Hilfe für die Definition von Toleranzgrenzen der globalen Mitteltemperatur für Ökosysteme sollte weltweit in den verschiedenen Regionen und Ökosystemen die interannuelle Variabilität von Klimaparametern mit der erwarteten Verschiebung dieser Parameter als Folge des Klimawandels verglichen werden. Man kann so für jedes Ausmaß an Klimaerwärmung den Prozentsatz der weltweiten Ökosystemfläche ermitteln, der wahrscheinlich geschädigt werden würde. Eine zu große Verschiebung würde vormalige extreme Witterungsereignisse in gewöhnliche Ereignisse verwandeln und so das Überleben des jeweiligen Ökosystems gefährden. Dieser Ansatz könnte helfen, die wissenschaftliche Basis für die Definition von Toleranzgrenzen für den Klimawandel zu verbessern.

Die integrierte Wirkungsforschung sollte schließlich die Wechselwirkungen zwischen der Klimaänderung und sozioökonomischen Faktoren sowie auch die Wechselwirkungen zwischen den Folgen der Klimaänderung auf verschiedene Sektoren intensiver untersuchen. Dabei ist insbesondere der Ansatz weiterzuentwickeln, die Anzahl der betroffenen Menschen zu ermitteln („Millions at risk“; Parry et al., 2001). So sollte der Frage nachgegangen werden, welche Folgen Wasserknappheit für sozioökonomische Systeme hat und was die Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmaßnahmen sind. Zur Quantifizierung der Gesundheitsfolgen von Klimaveränderung sollte dabei der DALY-Ansatz verwendet und weiterentwickelt werden.

2.2

Von der Klimaleitplanke zu Emissionspfaden

Nach der Definition einer Obergrenze für die globale Mitteltemperatur (Kap. 2.1.7) analysiert der WBGU im Folgenden verschiedene CO₂-Gleichgewichtskonzentrationen mit den entsprechenden kostenminimierenden Emissionspfaden, welche mit dem WBGU Klimafenster verträglich sind (Kap. 3). Die Definition solcher globalen CO₂-Emissionsprofile erfolgt in zwei Schritten: Zunächst werden Ziele für CO₂-Konzentrationen bestimmt, die mit dem Klimafenster vereinbar sind. Dazu sind einige Annahmen zu den Sicherheitsfaktoren notwendig (Kap. 2.2.1). Danach folgt die Bestimmung von CO₂-Emissionspfaden, die zu diesen Konzentrationen führen. Hierbei wird auch die Frage des besten Zeitpunkts für Emissionsreduktionen erörtert (Kap. 2.2.2).

2.2.1

Von Temperaturleitplanken zu CO₂-Stabilisierungszielen

Welches Stabilisierungsniveau der CO₂-Konzentration erforderlich ist, um innerhalb der in Kapitel 2.1 beschriebenen WBGU-Temperaturgrenze zu bleiben, ist sehr unsicher. Die maximale Konzentration hängt sowohl von der Emission anderer Treibhausgase und der Klimasensitivität als auch von der Stärke der Rückkopplungen im Kohlenstoffkreislauf und weiteren Unsicherheiten im Klimasystem ab. Diese Parameter und Unsicherheiten werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

EMISSIONEN ANDERER TREIBHAUSGASE UND VON AEROSOLTEILCHEN

Energie- und industriebedingte CO₂-Emissionen tragen einen Großteil zur Klimaänderung bei, und es wird erwartet, dass ihr Beitrag ohne Klimapolitik weiter zunehmen wird (IPCC, 2000). Diese Emissionen können sehr viel genauer gemessen und hochgerechnet werden als diejenigen aus Landnutzungsänderungen und anderer Treibhausgase, die im Kioto-Protokoll (Methan, Lachgas, SF₆, perfluorierte Kohlenwasserstoffe) oder Montreal-Protokoll (FCKW und HFCKW) geregelt werden. Im Gegensatz zu den Auswirkungen dieser langlebigen Treibhausgase ist der Klimaeffekt von anthropogenen Aerosolteilchen (z. B. Sulfate mit Kühlung) und Ruß (Erwärmung) sowie der indirekte Effekt der Vorläufersubstanzen des troposphärischen Ozons (CO, NO_x, VOCs) nur regional. Vor allem über den Strahlungsantrieb der Aerosole herrscht große Unsicherheit.

Auch die Unsicherheit über die gegenwärtigen Emissionen aus der Landnutzung ist hoch. Die größten Veränderungen in der Landnutzung werden durch die Nachfrage nach Acker- und Weideland erzeugt. Unterschiedliche Annahmen über die ökonomische, demografische und technologische Entwicklung führen zu verschiedenen Szenarios über die CO₂-Emission aus Landnutzung und Landnutzungsänderung (IPCC, 2000). Generell nehmen die Emissionen aufgrund der fortgesetzten Entwaldung in den Entwicklungsländern zunächst zu, um anschließend wegen des vermutlich geringeren Bevölkerungswachstums und gesteigerter Produktivität der Landwirtschaft abzunehmen.

Die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Treibhausgase (Methan, Lachgas, Halogenkohlenwasserstoffe) war im vergangenen Jahrhundert etwa den CO₂-Emissionen vergleichbar (Reilly et al., 2003). Diese Emissionen stammen aus einer Vielfalt von Sektoren und Anwendungen und sind deshalb mit größeren Unsicherheiten behaftet als die CO₂-Emissionen (IPCC, 2000).

KLIMASENSITIVITÄT

Klimasensitivität bezeichnet die Veränderung der mittleren globalen Oberflächentemperatur, die durch eine Verdopplung der atmosphärischen CO₂-Konzentration hervorgerufen wird. Die Klimasensitivität ist mit Abstand der größte Unsicherheitsfaktor bei der Prognose des Klimawandels und seiner Auswirkungen (Caldeira et al., 2003). Der IPCC (2001a) geht von einer Erwärmung von 1,7–4,2°C bei Verdopplung der vorindustriellen CO₂-Konzentration aus. Diese Werte wurden aus den Ergebnissen von sieben gekoppelten globalen Ozean-Atmosphäre-Zirkulationsmodellen gewonnen. Der Medianwert beträgt 2,6°C. Jedoch macht der IPCC keinerlei Aussage bezüglich des „wahrscheinlichsten“ Wertes für die Klimasensitivität. Es gibt verschiedene Studien zur Verteilung der Klimasensitivität in einer Wahrscheinlichkeitsfunktion. Einige ergeben sogar eine Wahrscheinlichkeit für Werte höher als 4,2°C (Andronova und Schlesinger, 2001; Forest et al., 2002; Knutti et al., 2002). Eine wesentliche Unsicherheit bei der Abschätzung betrifft die Stärke des kühlenden Effekts anthropogener Aerosole. Empirische Befunde deuten darauf hin, dass dieser Effekt stärker ist als bisher angenommen (Anderson et al., 2003). Das könnte bedeuten, dass die Klimasensitivität, vor allem die Antwort des Klimasystems ohne den kühlenden Effekt der Aerosole, höher ist als bisher eingeschätzt. Somit könnte die Erwärmungsrate im 21. Jahrhundert, in dem sich die Aerosolemissionen vermutlich verringern werden (IPCC, 2000), möglicherweise höher sein als bisher (IPCC, 2001a) angenommen. Dieser Effekt kann durch die Rück-

kopplungen im Kohlenstoffkreislauf sogar verstärkt werden, weil die Aerosole die Erwärmung durch die Treibhausgase dämpfen und dadurch die Kohlenstoffakkumulation zur Zeit verstärken. Auf diese Art fällt die Reaktion des Kohlenstoffkreislaufes zwar verzögert, aber stärker aus, weil terrestrisch gespeicherter Kohlenstoff zusätzlich freigesetzt wird. So werden negative Auswirkungen des Klimawandels auf den Kohlenstoffkreislauf in die Zukunft verlagert (Jones et al., 2003).

RÜCKKOPPLUNG MIT DEM KOHLENSTOFFKREISLAUF

Simulationen mit Klimamodellen mit interaktiven Komponenten, die den Land- und Meereskohlenstoffkreislauf modellieren, zeigen positive Rückkopplungen, d.h. die CO₂-Konzentrationen sind höher und auch der Klimawandel fällt am Ende des 21. Jahrhunderts stärker aus als ohne die Rückkopplung mit dem Kohlenstoffkreislauf (IPCC, 2001a). Dieser Rückkopplungseffekt kann durch die verringerte Aufnahme von CO₂ durch die Meere und die terrestrische Biosphäre erklärt werden: Die Erwärmung reduziert die Löslichkeit von CO₂ im Seewasser und reduziert damit die Aufnahme durch die Meere. Zusätzlich führt die Erwärmung wahrscheinlich zu einer zunehmenden vertikalen Schichtung der Meere, was zusätzlich zu einer verringerten Aufnahme von CO₂ durch die Meere führen würde.

Die Erwärmung verringert auch die terrestrische Aufnahme, indem die Rate erhöht wird, mit der lebende Organismen Biomasse zu CO₂ konvertieren. Die langfristigen Effekte sind noch nicht eindeutig geklärt. Die zur Zeit beobachtete Netto-CO₂-Aufnahme der terrestrischen Systeme wird schrumpfen, wenn die nachwachsenden Wälder in der nördlichen Hemisphäre altern und die Effekte der CO₂- und Stickstoffdüngung abnehmen. Außerdem führt der Klimawandel zu wachsenden Störungen und Mineralisierungsraten (IPCC, 2001d; WBGU, 1998).

Verschiedene Vegetationsmodelle kommen zu dem Ergebnis, dass die momentane globale Netto-CO₂-Aufnahme der terrestrischen Systeme zunächst zunehmen wird, um dann entweder konstant zu bleiben oder abzunehmen (Cramer et al., 2001). Nach Aussage mehrerer Modellprojektionen kann der Höhepunkt innerhalb des 21. Jahrhunderts erreicht werden. Der Klimawandel (insbesondere veränderte Niederschlagsmuster) kann zu weit reichenden Veränderungen bei der Vegetationsverteilung und -struktur führen (Kap. 2.1.2). Die Modelle zeigen, dass in Afrika, Amerika und Südostasien große Waldflächen durch Dürre vernichtet werden können (Cramer et al., 2001). Wenn Wälder durch Grassteppen ersetzt werden, wird der in den Wäldern gespeicherte Kohlenstoff freigesetzt. Jones et al. (2003)

berechnen den Effekt des Klimawandels und der veränderten Konzentration von Treibhausgasen auf die terrestrische Biosphäre, indem sie ein globales Klimamodell mit einem dynamischen Vegetationsmodell koppeln, wobei auch die Wirkung von Aerosolen berücksichtigt wird. Zunehmende Atmung der Pflanzen und der Rückgang der Amazonaswälder führen im Modell dazu, dass die terrestrische Biosphäre ungefähr 2040 zu einer Netto-Quelle wird (Jones et al., 2003). Aufbauend auf diesen Modellergebnissen erreichen bis 2100 die terrestrischen Kohlenstoffquellen 7 Tg C pro Jahr. Damit übersteigen sie bis 2080 sogar die Kohlenstoffsenken der Meere. Der Übergangcharakter der derzeitigen terrestrischen Kohlenstoffsenken hat wichtige Konsequenzen für den angemessenen Umgang mit der terrestrischen Biosphäre innerhalb des Anrechnungsrahmens des Kioto-Protokolls (Kap. 4). Verringerte Emissionen durch Verzicht auf Nutzung fossiler Brennstoffe bedeuten, dass der Kohlenstoff in sicheren fossilen Lagerstätten verbleibt. Im Gegensatz dazu bergen Maßnahmen zur Vergrößerung der biosphärischen Kohlenstoffvorräte immer das Risiko, dass der zusätzlich eingelagerte Kohlenstoff z. B. durch Landnutzungsänderungen, Klimawandel oder Feuer zu einem späteren Zeitpunkt wieder in die Atmosphäre gelangt.

2.2.2

Von Stabilisierungszielen zu Zeitpfaden von Emissionen

Ein vorgegebenes Stabilisierungsniveau für die CO₂-Konzentration kann durch unterschiedliche Emissionspfade erreicht werden, selbst wenn man das selbe Zieljahr wählt. Sind in den ersten Jahrzehnten höhere Emissionen erlaubt, erfordert dies später stärkere Reduktionen. Solche Verzögerungen der Emissionsminderung führen zu einer rascheren Erwärmung in den ersten Jahrzehnten. Ob kurzfristige stärkere Minderungen oder aber der Aufschub von Klimaschutzmaßnahmen kostengünstiger sind, um ein bestimmtes Konzentrationsziel zu erreichen, hängt davon ab, welche Diskontraten angenommen werden und in welcher Form technologisches Lernen einbezogen wird. Während einige Studien davon ausgehen, dass eine Verzögerung von Klimaschutzmaßnahmen zu niedrigeren Kosten führt (Wigley et al., 1996; Manne und Richels, 1997), zeigen andere, dass frühzeitiges Handeln einen rascheren Einsatz vorhandener Niedrig-Emissions-Technologien einleiten und dadurch Kosten senken kann (technologisches Lernen). Auch beseitigt es das Risiko der Pfadabhängigkeit von kohlenstoffintensiven Technologien

(Grübler und Messner, 1998; van Vuuren und de Vries, 2001).

Die Festlegung eines langfristigen Konzentrationsziels scheint angesichts hoher Unsicherheiten in Bezug auf ein tolerables Konzentrationsniveau weder möglich noch empfehlenswert (Kap. 2.2.1). Daher sind Entscheidungsrahmen zum Umgang mit dieser Unsicherheit entwickelt worden (IPCC, 2001d). Dabei muss die Trägheit des Energiesystems berücksichtigt werden: Wenn z. B. eine Konzentration von 550 ppm als tolerabel erachtet wird, einige Jahrzehnte später aber neue Forschungen ergeben, dass ein niedrigeres und damit anspruchsvolleres ppm-Ziel anzustreben ist, müssten die Emissionen drastisch verringert werden. Sind aber erst einmal Investitionen in langfristige Infrastrukturmaßnahmen geleistet worden, ist es aufwändig und teuer, den Entwicklungspfad eines Energiesystems zu verändern (Pfadabhängigkeit).

Ha-Duong et al. (1997) zeigen, dass die wirtschaftlichen Risiken, die sich aus dem Aufschieben von Minderungsmaßnahmen ergeben, es rechtfertigen, CO₂-Emissionen aus Energiesystemen sofort zu reduzieren – vorausgesetzt, es besteht eine ausreichende Wahrscheinlichkeit, dass die Treibhausgasemissionen unter der doppelten Menge der vorindustriellen Zeit gehalten werden müssen (dies entspricht etwa einer CO₂-Konzentration von 450 ppm). Dies ist sogar dann richtig, wenn technologisches Lernen nicht berücksichtigt wird, was frühzeitiges Handeln noch stärker begünstigen würde. Auch sind wachsende Schäden durch den Klimawandel zu berücksichtigen, die durch die Verspätung der Emissionsreduktion in Kauf genommen werden. Hierfür sind die Ungewissheit in Bezug auf die Definition eines tolerablen Konzentrationsniveaus und die Trägheit der Energiesysteme maßgeblich: Die Kosten eines späten Handelns (und die Möglichkeit, dass neue Forschungsergebnisse drastischere Klimaschutzziele notwendig machen) überwiegen dann die Kosten frühzeitigen Handelns (Hourcade et al., 2001). Dieses Fazit wird noch gestützt, wenn man den technologischen Wandel und „learning-by-doing“ einbezieht, weil dadurch die Kosten umso stärker minimiert werden, je früher Emissionsminderungen stattfinden.

Die Unsicherheit in Bezug auf die Definition eines tolerablen Konzentrationsniveaus lässt daher „Absicherungsstrategien“ (IPCC, 2001c) sinnvoll erscheinen. Selbst wenn zum Beispiel eine CO₂-Stabilisierung auf 450 ppm als angemessene Schätzung eines tolerablen Niveaus gilt, ist es kosteneffizienter, einem niedrigen Emissionspfad zu folgen als einem, der zu einer Stabilisierung bei 450 ppm führt. Das gilt, solange es keine Gewissheit bezüglich des tolerablen Stabilisierungsniveaus gibt, bzw. solange es

nicht unwahrscheinlich ist, dass das zunächst angepeilte Ziel sich als ein zu „gefährliches“ Ziel herausstellt.

2.2.3 Fazit

Ausgehend von einer Analyse der Unsicherheit über die mittlere globale Erwärmung im Zusammenhang mit bestimmten CO₂-Konzentrationen hat sich der WBGU entschlossen, zwei verschiedene CO₂-Konzentrationsniveaus (400 und 450 ppm) zu untersuchen. Unter bestimmten Annahmen in Bezug auf die Klimasensitivität und andere Emissionen (z. B. Entwaldung, Landwirtschaft) liegen diese innerhalb des WBGU-Klimafensters (Kap. 2.1.1). Wegen der großen Unsicherheiten bezüglich des Klimasystems wäre die Festlegung eines tolerablen Konzentrationsniveaus übereilt. Der WBGU empfiehlt niedrige und damit anspruchsvolle Konzentrationsziele (unter 450 ppm) zu verfolgen. Würden höhere und damit weniger anspruchsvolle ppm-Ziele angestrebt und müsste man später auf niedrigere ppm-Werte übergehen, würde dies einen drastischen Emissionsrückgang bedeuten, der zweifellos zu erheblichen Friktionen führen würde.

Die unsichere Rolle der terrestrischen Biosphäre im Kohlenstoffkreislauf und der vorübergehende Charakter der heutigen Kohlenstoffsenken machen es sehr riskant, Verpflichtungen zu Emissionsminderungen mit terrestrischen Senken zu verrechnen (Kap. 4).

Zur Operationalisierung von Art. 2 UNFCCC sind in der Forschung insbesondere Ansätze der integrierten Modellierung weiterzuverfolgen, welche viele Akteure mit unterschiedlichen Interessen und vielfältigen Unsicherheiten berücksichtigen und auf dem Ansatz der „Klimatoleranzfenster“ (Kap. 2.1.1) beruhen. Dabei wird die normative Setzung von Leitplanken und die Untersuchung der Folgen globaler Klimaänderungen von der Ermittlung zulässiger Emissionspfade sowie optimaler Strategien methodisch getrennt. Insbesondere sind hierzu neben Kohlenstoff die Reduktionspotenziale (einschließlich der damit verbundenen Kosten) anderer Treibhausgase in entsprechende Modelluntersuchungen zu integrieren. Dadurch können kostenminimale Strategien zum Erreichen des WBGU-Klimafensters unter Einbeziehung aller klimawirksamen Gase ermittelt werden. Auch bedarf es weiterer Analysen und Forschungen zu Handeln unter Unsicherheit (z. B. Ansätze mit verschiedenen Akteuren mit potenziell missbräuchlichem Verhalten).

Zur Untersuchung von Minderungsstrategien und ihrer ökonomischen und anderer Auswirkungen

sollte schließlich eine Vielfalt an Stabilisierungsszenarios analysiert werden. Dadurch kann ein Spektrum möglicher Zukünfte berücksichtigt werden, wie sie etwa durch die SRES-Szenarios (IPCC, 2000) dargestellt werden. Ziel ist dabei, die Kosten abschätzen zu können. Dabei sollten auch Kohlendioxidkonzentrationen unterhalb von 450 ppm als Zielniveaus untersucht werden.

2.3 Ansätze zur Einhaltung vorgegebener Emissionsprofile

2.3.1 Grundsätze zur Verteilung von Emissionsrechten

Ausgehend von einem globalen Zielpfad für Emissionen, der „gefährliche“ Klimaveränderungen vermeidet, können und müssen Zielpfade für Emissionen so auf Länder- und regionale Ebene heruntergebrochen werden, dass der globale Emissionspfad eingehalten werden kann. Länderspezifische Emissionsrechte dürfen also zusammen genommen die globalen Emissionsvorgaben nicht überschreiten. Vergleicht man derartige Emissionspfade mit denjenigen, die man ohne gegensteuernde Maßnahmen erwarten würde (Emissionen in den Referenzszenarios), so lässt sich ein Zeitprofil für die erforderlichen Emissionsreduktionen errechnen.

Da verschiedene regionalisierte Emissionspfade mit dem globalen Emissionspfad vereinbar sind, stellt sich die Frage, anhand welcher Kriterien die Emissionsrechte und die sich hieraus ergebenden Reduktionsverpflichtungen vergeben werden sollen. Hierzu werden verschiedene Ansätze diskutiert. Diese tragen den Grundsätzen der Klimarahmenkonvention für eine gerechte Übernahme von Klimaschutzverpflichtungen (Art. 3 Ziff. 1 UNFCCC) in unterschiedlichem Maß Rechnung. Zum einen ist dies der Grundsatz der gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortlichkeiten (Verantwortlichkeitsprinzip), d.h. die Länder übernehmen Reduktionsverpflichtungen im Wesentlichen entsprechend ihrem historischen und gegenwärtigen Beitrag zur Verursachung der Klimaerwärmung. Zum anderen ist dies der Grundsatz, dass die Länder entsprechend ihrer Fähigkeiten zum Klimaschutz beitragen (Fähigkeitsprinzip), d.h. insbesondere gemäß ihrer ökonomischen und technologischen Leistungsfähigkeit. In der Diskussion ist außerdem das Kriterium der Bedarfsgerechtigkeit (Bedarfsprinzip; Berk und den Elzen, 2001; Höhne et al., 2003), das sich aus der Klimarahmenkonvention (Art. 3 Ziff. 2 UNFCCC) und ihrer Präambel mittelbar ableiten lässt. Ausge-

hend davon, dass jede Person bzw. jedes Land Anspruch auf ein gewisses Maß an Wohlfahrt hat, folgt aus dem Grundsatz der Bedarfsgerechtigkeit, dass dem Recht auf Entwicklung und daraus resultierenden unterschiedlichen Entwicklungsbedürfnissen ebenso Rechnung zu tragen ist wie z. B. geographisch-klimatisch bedingten Unterschieden im Emissionsbedarf. Eine Konkretisierung des Bedarfsprinzips lässt sich aus der Klimarahmenkonvention nicht direkt herleiten, so dass das Prinzip allenfalls eingeschränkt operationalisierbar ist. Eine mögliche Konkretisierung sieht der Beirat allerdings in einem „Grundsatz der Gleichheit“, welcher sich aus dem Menschenrecht auf Gleichbehandlung sowie, im Verhältnis der Vertragsparteien, aus dem Prinzip der Gerechtigkeit herleiten lässt („equity“; Art. 3 Ziff. 1 UNFCCC; Kokott, 1999).

Ergänzend postuliert der Beirat das „Prinzip der Stetigkeit“, wonach in sozioökonomischen Systemen sprunghafte Maßnahmen mit drastischen Auswirkungen vermieden werden sollten, die zu schwer wiegenden, die Wirtschaft aller Regionen betreffenden Folgen führen könnten.

2.3.2

Verringerung und Konvergenz

Das Modell der „Verringerung und Konvergenz“ (Contraction and Convergence, C&C; Meyer, 2000) geht von einem grundsätzlich gleichen Recht aller Individuen auf Emissionen aus. Dies lässt sich aus dem Menschenrecht auf Gleichbehandlung ableiten, entspricht dem Prinzip der Gerechtigkeit in der Klimarahmenkonvention („equity“; Art. 3 Ziff. 1 UNFCCC) und somit dem vom Beirat postulierten Grundsatz der Gleichheit.

Das globale Emissionsbudget, das sich für jeden Zeitpunkt aus dem Zielpfad für die globalen Emissionen herleiten lässt, wird in diesem Ansatz so aufgeteilt, dass die Pro-Kopf-Emissionsrechte aller Länder bzw. Regionen konvergieren und ab einem festzulegenden Konvergenzjahr übereinstimmen. Dies kann linear oder nicht linear mit einer ebenfalls festzusetzenden Rate erfolgen. Aus pragmatischen Gründen und dem Prinzip der Stetigkeit folgend wird die Realisierung des Rechts auf gleiche Emissionen pro Kopf erst mit einer Verzögerung um einige Dekaden (etwa bis zum Jahr 2050 oder 2100 als Zeitjahr der Konvergenz) angestrebt. Dem Prinzip der wirtschaftlichen (Leistungs-)Fähigkeit wird dadurch Rechnung getragen, dass die Industrieländer nach diesem Modell im Durchschnitt deutlich höheren Reduktionspflichten als die Entwicklungsländer unterliegen. Konflikte zwischen einer Zuteilung von Emissionsrechten gemäß der Verringerung

und Konvergenz und dem Fähigkeitsprinzip werden aber sichtbar, wenn anstelle der Gruppierungen „Industrieländer“ und „Entwicklungsländer“ einzelne Länder einander gegenübergestellt werden. Der Grundsatz unterschiedlicher Verantwortlichkeiten kommt zwar insoweit zum Tragen, als die Reduktionslast der Länder pro Kopf umso höher ist, je größer ihr gegenwärtiger Anteil an den Treibhausgasemissionen pro Kopf ist. Unterschiede in den historischen Verantwortlichkeiten bleiben dabei aber im Wesentlichen unberücksichtigt.

In Bezug auf den CO₂-Emissionspfad besitzt der Ansatz der „Verringerung und Konvergenz“ eine hohe Zielgenauigkeit, da die Emissionsbudgets langfristig vorgegeben sind und keinerlei Schwankungen unterliegen.

2.3.3

Drei-Sektoren-Ansatz („Triptych“)

Ein Ansatz, der strukturelle Unterschiede explizit berücksichtigt, ist der sogenannte Triptych-Ansatz (Berk und den Elzen, 2001; den Elzen, 2003). Dabei werden für drei verschiedene Sektoren länderspezifische Emissionsbudgets errechnet, und zwar für den Energie-, den Industrie- und den Haushaltssektor (Michaelowa et al., 2003). Die Budgets basieren auf Annahmen über künftige wirtschaftliche und technische Entwicklungen in den Sektoren, weiter wird von einer Konvergenz der Haushalts-Emissionen ausgegangen. Dies bildet die Bemessungsgrundlage für die Reduktionsverpflichtungen der einzelnen Länder. Der Triptych-Ansatz ist allein aufgrund seiner Abhängigkeit von den Annahmen über die Entwicklung einzelner Sektoren in den Mitgliedstaaten schwer operationalisierbar. Zudem kann er in Widerspruch zum Prinzip der unterschiedlichen Verantwortlichkeiten treten. Die in der Vergangenheit geschaffene Emissionssituation schlägt möglicherweise stark zu Buch, wenn die bisherigen hohen Emissionen eines Landes mit einem großen emissionsintensiven Sektor auch künftig hohe Emissionsbudgets nach sich ziehen. Dies bedeutet eine nicht zu rechtfertigende Begünstigung historisch emissionsintensiver Länder.

2.3.4

Multisektoren-Konvergenz

Ähnlich wie der Triptych-Ansatz berücksichtigt auch der Multisektoren-Konvergenz-Ansatz (Jansen et al., 2001) strukturelle Unterschiede zwischen Ländern oder Ländergruppen. Hier werden unter Bezugnahme auf ein fixiertes Konvergenzjahr für

sieben Sektoren konvergierende Pro-Kopf-Ziele bestimmt und auf dieser Grundlage länderspezifische Emissionsbudgets verbindlich festgelegt.

Neben den bereits erwähnten kritischen Punkten der schwierigen Operationalisierbarkeit und einer gewissen Begünstigung von Ländern mit historisch emissionsintensiven Sektoren liegt ein weiteres Problem aller sektorspezifischen Ansätze in den hohen Anforderungen an die länderspezifische Datenlage. Die für die Berechnung von sektorspezifischen Emissionsbudgets benötigten Daten sind häufig nicht verfügbar bzw. leicht manipulierbar.

2.3.5

Brasilianischer Vorschlag

Ein Ansatz, der die historische Verantwortlichkeit betont, geht auf einen Vorschlag Brasiliens zur Verteilung der Verpflichtungen der Anlage-I-Staaten der Klimarahmenkonvention zurück. Danach müssen Staaten umso mehr Emissionsreduktionen übernehmen, je mehr sie in der Vergangenheit zum Klimaproblem beigetragen haben. Die historische Verantwortlichkeit soll dabei am Beitrag zur globalen Erwärmung gemessen werden. Es ist allerdings ein Referenzzeitpunkt festzulegen. Es empfiehlt sich, einen Zeitpunkt zu wählen, zu dem das Problem des Klimawandels der Staatenwelt bereits bewusst gewesen ist, z. B. das Jahr 1990 (Veröffentlichung des ersten Sachstandsberichts des IPCC). Andernfalls könnte der Ansatz auf eine „Haftung“ für damals nicht erkennbar schädliches Verhalten hinauslaufen. Von vielen Industrie- und Transformationsländern wird befürchtet, dass mit dem brasilianischen Vorschlag eine drastische und ökonomisch kaum verkraftbare Ad-hoc-Umstellung einherginge.

2.3.6

Mehrstufen-Ansatz

Anders als bei den bisher dargestellten Ansätzen zur Zuteilung von Emissionsrechten bzw. Verteilung von Reduktionspflichten geht es beim Mehrstufen-Ansatz weniger um die Festlegung der Verteilungsnorm als um ein mögliches Verfahren, um einzelne Länder(gruppen) schrittweise in das Regime einzubinden. Während also etwa beim Ansatz „Verringerung und Konvergenz“ und beim brasilianischen Vorschlag in der Regel davon ausgegangen wird, dass alle beteiligten Länder unmittelbar in das Reduktionssystem integriert werden, sieht der Mehrstufen-Ansatz (Multi-Stage Approach; Berk und den Elzen, 2001; den Elzen, 2003) einen graduellen Einstieg in das Reduktionssystem vor. Hier beteiligen sich

unterschiedliche Ländergruppen in verschiedenen Stufen an Reduktionsverpflichtungen. Dies reicht vom völligen Fehlen einer Reduktionsverpflichtung bis hin zu einer am Wirtschaftswachstum orientierten Abbauverpflichtung oder einem absoluten Reduktionsziel.

Dieser Ansatz ist flexibel bezüglich der Wahl von Kriterien für die Einbindung von Staaten in die verschiedenen Stufen, bezüglich der Festlegung der Art der Reduktionsziele (absolute Reduktionsziele, Intensitätsziele, Sustainable Development Policies and Measures – SDPAMs, usw.) sowie bezüglich der Kriterien für die Differenzierung der Reduktionspflichten aller Staaten auf einer Stufe (Berk und den Elzen, 2001). Je nachdem, wie man die Reduktionspflichten auf einer Stufe präzisiert, kommt den einzelnen Gerechtigkeitsprinzipien im Rahmen eines Mehrstufen-Ansatzes unterschiedliche Bedeutung zu.

Im Hinblick auf die Verhandlungsdynamik ist die Flexibilität des Mehrstufen-Ansatzes von Vorteil, dagegen stellt sie im Hinblick auf die Einhaltung ambitionierter Reduktionsvorgaben ein Risiko dar. Außerdem werfen die meisten der für die Zwischenstufe diskutierten relativen Emissionsreduktionsziele (Intensitätsziele, SDPAMs usw.) erhebliche Implementations-, Mess- und Kontrollprobleme auf. Letztlich handelt es sich beim Mehrstufen-Ansatz eher um eine Prognose möglicher Verhandlungsabläufe als um eigenständige, wissenschaftliche Kriterien zur Allokation der Reduktionsverpflichtungen.

2.3.7

Fazit

Insbesondere unter Berücksichtigung der Zielgenauigkeit in Bezug auf die CO₂-Emissionen sowie unter Beachtung des grundsätzlich gleichen Rechts aller Individuen auf Emissionen und das Prinzip der Steitigkeit hat sich der Beirat dafür entschieden, die Implikationen einer Zuteilung von Emissionsrechten nach dem Modell der „Verringerung und Konvergenz“ zu betrachten. Verglichen werden sollen dabei die Unterschiede zwischen bis 2050 und bis 2100 konvergierenden Szenarios. In beiden Fällen wird der Einfachheit halber von einer linearen Konvergenz ausgegangen. Für die Bevölkerungsentwicklung wird kein Stichjahr angenommen, da dies gravierende Eingriffe in die Politiken von Ländern mit hohem Bevölkerungswachstum bedeuten würde (Kap. 3.2).

Für die konkrete praktische Umsetzung eines solchen langfristig orientierten Ansatzes der „Verringerung und Konvergenz“ ist zu klären, mit welchen kurz- und mittelfristigen Maßnahmen die langfristige

Konvergenz erreicht werden kann. Dabei ist auch zu überlegen, wie der Ansatz modifiziert werden müsste, wenn nicht alle Länder in der Lage sind, dieses Regime von Anfang an zu akzeptieren. Hierfür bietet es sich an, auf die Vorgehensweise des Mehrstufen-Ansatzes zurückzugreifen, der ja explizit einen gestaffelten Einstieg verschiedener Länder in das System vorsieht. Hierauf wird in Kapitel 5 genauer eingegangen.

3.1 Klimapolitik und nachhaltige Energiesysteme

3.1.1 Leitplanken nachhaltiger Energiepolitik

Der Beirat hat in seinem Hauptgutachten „Energie- wende zur Nachhaltigkeit“ (WBGU, 2003) einen exemplarischen Pfad für die Transformation des globalen Energiesystems entwickelt, der sich neben einem ehrgeizigen Klimaschutz auch durch starkes wirtschaftliches Wachstum und globale Konvergenz auszeichnet. Im Gutachten konnte gezeigt werden, dass eine nachhaltige Transformation des globalen Energiesystems, die im Einklang mit den vom Beirat entwickelten Leitplanken nachhaltiger Energiepolitik steht, möglich ist (WBGU, 2003).

Aufbauend auf diesen Leitplanken hat der WBGU das realisierbare nachhaltige Potenzial für die Transformation zur Verfügung stehenden Energiequellen analysiert. Dieses nachhaltige Potenzial ist vielfach erheblich geringer als die entsprechenden technischen oder gar theoretischen Potenziale. Das nachhaltige Potenzial fossiler Energiequellen wird im Wesentlichen durch die geforderte Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration bestimmt (Kap. 2.2). Ebenso ergeben sich auch bei einigen erneuerbaren Energieformen wesentliche Restriktionen, etwa für Biomasse 100 EJ pro Jahr, Windenergie 140 EJ pro Jahr, Wasserkraft mittelfristig 12 EJ pro Jahr und langfristig 15 EJ pro Jahr. Lediglich das Potenzial der Solarenergie kann in Relation zum anthropogenen Energieverbrauch als quasi unbegrenzt bezeichnet werden. Die Nutzung der Kernspaltungsenergie ist mit inakzeptablen Risiken verbunden, so dass der WBGU empfiehlt, bestehende Kraftwerke mit dem Ende der derzeitigen Betriebsgenehmigungen auslaufen zu lassen und keine weiteren mehr zu bauen. Im Rahmen der gegebenen Pfadabhängigkeiten wird ein globaler Ausstieg aus der Kernenergienutzung bis zum Jahr 2050 für akzeptabel und machbar gehalten. Zudem

scheint das Gefährdungspotenzial von Fusionskraftwerken ebenfalls beträchtlich zu sein. Da Fusionskraftwerke – wenn überhaupt – frühestens in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zur Verfügung stehen, empfiehlt der Beirat, Fusionskraftwerke für die Energiewende nicht zu berücksichtigen.

In der Abtrennung von CO₂ aus dem Abgas von Energieumwandlungssystemen und der nachfolgenden Speicherung des Kohlendioxids in geologischen Formationen sieht der WBGU eine Übergangstechnologie, deren nachhaltiges Potenzial unter besonderer Berücksichtigung der Sicherheit entsprechender Lagerstätten bei kumulativ etwa 300 Gt C gesehen wird (WBGU, 2003). Die Lagerung in Ozeanen wird für nichtnachhaltig gehalten (WBGU, 2003). Da die Kohlenstoffspeicherung insgesamt nur eine Übergangsfunktion haben kann, wird ihr Auslaufen bis zum Jahr 2100 empfohlen.

Energieverbrauchssenkungen sind zudem infolge erheblicher jährlicher Verbesserungen der Energieintensität ebenso wichtig wie der Umbau der Versorgungsseite.

Es muss außerdem berücksichtigt werden, dass die technische CO₂-Stabilisierung durch Emissionen aus natürlichen Speichern (Kap. 4) gefährdet werden kann. Daher müssen diese Speicher z. B. durch geeignete Maßnahmen in der Landnutzung geschützt werden.

3.1.2 Globale Klimaschutzszenarios

3.1.2.1 Weiterentwicklung der IPCC-Klimaschutzszenarios

Die potenziellen Entwicklungspfade des globalen Energiesystems unter bestimmten CO₂-Stabilisierungsniveaus variieren je nach demografischen, ökonomischen und technologischen Randbedingungen erheblich (IPCC, 2000; WBGU, 2003). Der WBGU hat daher bereits früher eine Reihe möglicher Entwicklungen unter Berücksichtigung der WBGU-

Leitplanken analysiert (SRES- und Post-SRES-Szenarios: IPCC, 2000, 2001c). Der oben genannte exemplarische Pfad für die Transformation des globalen Energiesystems, der auf dem Post-SRES-Szenario A1T-450 von IIASA aufbaut, wurde auf der Basis dieser Analysen entwickelt.

Um diesen Ansatz weiter zu vertiefen und darüber hinaus regional aufgelöste Informationen innerhalb verschiedener Zukunftspfade zu erhalten, wurde die entsprechende Szenarioentwicklung von IIASA im Auftrag des WBGU fortgeführt (Nakicenovic und Riahi, 2003a, b). Die Szenarios wurden hierbei mit einem Energiesystemmodell (MES-SAGE) erstellt, das mit einem makroökonomischen Modell (MACRO) verknüpft und iteriert wurde. Hierdurch werden u. a. Energienachfrage und -kosten im Modell endogen bestimmt, wobei eine makroökonomische Optimierung angenommen wird. Während also der exemplarische Pfad des WBGU auf einem konsistenten Mengengerüst basiert, handelt es sich bei den hier verwendeten IIASA-Modellen um Optimierungsalgorithmen mit endogenen Parametern. Grundlage der im Folgenden beschriebenen Szenarios waren die SRES-Familien B1, B2 und A1T mit den in Tabelle 3.1-1 beschriebenen Eigenschaften. Der Beirat ist der Ansicht, dass die Grundlagen der SRES A2-Welt (heterogene Welt, keine Nachhaltigkeitsausrichtung, langsame Technologieentwicklung, geringe Effizienzsteigerung und Dekarbonisierung) die Erreichbarkeit von Klimaschutzzielen äußerst unwahrscheinlich machen. Daher wurde kein A2-Szenario in die vorliegende Untersuchung aufgenommen.

Aufbauend auf B1, B2 und A1T wurden verschiedene Kalibrierungen aktualisiert und die Kohlenstoffspeicherung bei Biomasse-Verwertungsanlagen als Netto-CO₂-Senke zusätzlich in die Technologie-Portfolios aufgenommen. Außerdem wurden in zwei

dieser Szenario-Familien (A1T, B1) die Nachhaltigkeitsanforderungen des Beirats (Kap. 3.1.1) als Randbedingungen vorgegeben, während B2 den WBGU-Randbedingungen nicht unterworfen wurde. Die resultierenden so genannten Referenzszenarios werden im Folgenden als A1T*, B1* und B2 bezeichnet (* = erstellt unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Randbedingungen nachhaltiger Energiesysteme; Abb. 3.1-1). Aufbauend auf diesen Referenzszenarios wurden anschließend anspruchsvolle CO₂-Stabilisierungsziele implementiert (B1* und B2: 400 ppm, A1T*: 450 ppm, siehe Kap. 2.2). Die entsprechenden Klimaschutzszenarios werden im Folgenden als B1*-400, B2-400 und A1T*-450 bezeichnet (Abb. 3.1-1).

Die Resultate des A1T*-450-Szenarios knüpfen hierbei an die Entwicklung des exemplarischen Pfads im WBGU-Gutachten „Energiewende zur Nachhaltigkeit“ an, so dass hier zum Vergleich eine CO₂-Stabilisierungskonzentration von 450 ppm für die Szenario-Entwicklung ausgewählt wurde. Aus dem starken Wirtschaftswachstum der A1-Welt resultiert ein hoher Energieverbrauch. Gleichzeitig wird die Nutzung einiger kohlenstofffreier Energiequellen aufgrund übergeordneter Nachhaltigkeitsüberlegungen eingeschränkt (Biomasse, Wasserkraft, Wind, Kernenergie; siehe 3.1.1). Daher mussten die Annahmen des Szenarios gegenüber dem Original A1T-450 Post-SRES-Szenario an einigen Stellen weiter modifiziert werden. Insbesondere die Realisierung eines kohlenstoffarmen Transportsektors erwies sich in A1T*-450 wegen der quantitativen Beschränkungen bei Biotreibstoffen als schwierig, so dass die maximale Verbreitungsgeschwindigkeit von Wasserstofftechnologien im Modell gegenüber den SRES-Annahmen erhöht wurde. Daneben etablieren sich zudem batteriegetriebene Elektrofahrzeuge. Außerdem wurde eine gesteigerte Fähigkeit des glo-

| SRES-Welt | Storyline |
|-----------|---|
| A1 | Sehr großes ökonomisches Wachstum, Markt- und Technologieorientierung, Globalisierung, zunehmende Mobilität, Konvergenz zwischen den Weltregionen, Verringerung der globalen Energieintensität oberhalb historischer Raten (1,3% pro Jahr), niedriges Bevölkerungswachstum (9 Mrd. in 2050, 7 Mrd. in 2100). A1T: schnelle Entwicklung nicht fossiler Energieträger, großmaßstäblicher Einsatz von Wasserstofftechnologie. |
| B1 | Großes ökonomisches Wachstum, dynamische Technologieentwicklung, Globalisierung, Konvergenz zwischen den Weltregionen, starke ökologische und soziale Orientierung, Wandel zu einem weniger materialistischen Lebensstil, niedriges Bevölkerungswachstum, Verringerung der globalen Energieintensität oberhalb historischer Raten (2% pro Jahr). |
| B2 | Lokale und regionalspezifische Entwicklungspfade, moderate ökonomische und technologische Entwicklung (Projektionen entlang historischer Trends, „Business-as-usual“), mittleres Bevölkerungswachstum (10 Mrd. in 2100), Verringerung der Energieintensität mit historischer Rate (1% pro Jahr). |

Tabelle 3.1-1
Überblick über ausgewählte SRES-Storylines.
Quelle: IPCC, 2000

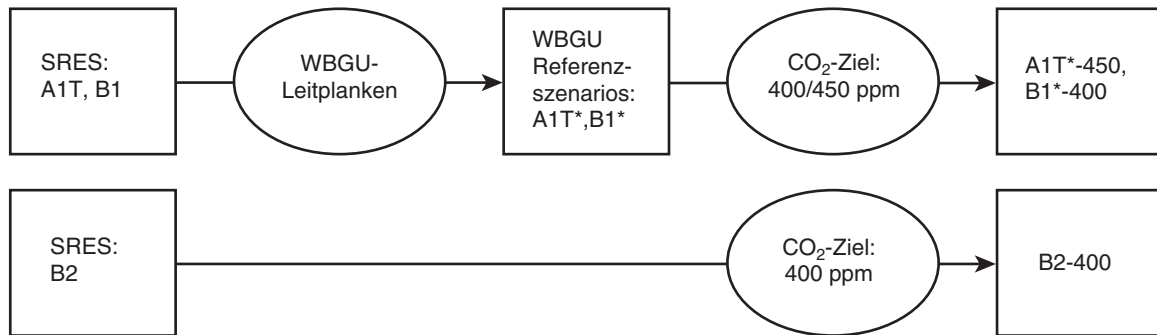


Abbildung 3.1-1

Namensbildung der Szenarios. Ausgangspunkt der im Text beschriebenen Szenarioentwicklung waren die SRES-Familien A1T, B1 und B2. In zwei dieser Szenariofamilien (A1T, B1) wurden die Nachhaltigkeitsanforderungen des Beirats als Randbedingungen berücksichtigt, die resultierenden Referenzszenarios werden mit A1T* und B1* bezeichnet. In die Referenzszenarios wurden anspruchsvolle CO₂-Stabilisierungsziele implementiert (A1T*: 450 ppm; B1* und B2: 400 ppm), die resultierenden Klimaschutzszenarios werden mit A1T*-450, B1*-400 und B2-400 bezeichnet. * = erstellt unter Berücksichtigung der WBGU-Leitplanken nachhaltiger Energiesysteme.

Quelle: WBGU

balen Energiesystems angenommen, auf höhere Energiepreise mit Nachfragesenkung zu reagieren. In der Folge verbesserte sich die globale Energieintensität sowohl in A1T* als auch in A1T*-450 um bis zu 2% jährlich. Dennoch war im Rahmen der IIASA-Modelle (mit endogener Bestimmung wesentlicher Parameter) der Ausstieg aus der geologischen Kohlenstoffspeicherung zum Jahr 2100 im CO₂-stabilisierenden A1T*-450 nicht möglich.

Für die CO₂-stabilisierenden Szenarios im Rahmen der B1- und B2-Familie wurde eine niedrigere Stabilisierungskonzentration von 400 ppm ausgewählt, um die in Kauf zu nehmenden Unsicherheiten bezüglich der Klimaentwicklung zu verringern (Kap. 2.2). Während die B2-Familie eine „Business-as-usual“-Welt markiert, entspricht die B1-Familie eher einer globalen Nachhaltigkeitswelt (geringes Bevölkerungswachstum, schnelles ökonomisches Wachstum, schnelle globale Konvergenz, starke Orientierung an Nachhaltigkeitszielen usw.). Diese wurde im aktuellen B1*-Szenario noch um Nachhaltigkeitskriterien im Energiesystem erweitert. Der Vergleich zwischen B2-400 als Referenzwelt ohne Nachhaltigkeitsvorgaben und B1*-400 erlaubt daher Schlussfolgerungen über die Kombination von Klimapolitik mit politischen Ansätzen für eine nachhaltige Entwicklung.

Die Zuteilung von Emissionsrechten hat einen Einfluss auf die Finanzflüsse und damit auch auf die regionalen Entwicklungspfade. Hier wurde in allen CO₂-stabilisierenden Szenarios ein linearer Ansatz der Verringerung und Konvergenz gewählt (Kap. 2.3.2). Für jedes der CO₂-stabilisierenden Szenarios wurden dabei zwei Varianten berechnet: eine mit dem Konvergenzjahr 2050 für die Pro-Kopf-Emissionen und eine weitere mit dem Konvergenzjahr 2100.

3.1.2.2

Ergebnisse: Globale Energiesysteme der IIASA-WBGU-Szenarios

Die globalen Primärenergie-Portfolios der resultierenden Referenzszenarios A1T*, B1* und B2 sowie der CO₂-stabilisierenden Szenarios A1T*-450, B1*-400 und B2-400 sind in Abb. 3.1-2 dargestellt. Abb. 3.1-3 zeigt die entsprechenden globalen Entwicklungspfade als Trajektorien in einem Dreieck zwischen den Eckpunkten Kohle, Öl/Gas und erneuerbare Energien/Kernenergie. Es ist erkennbar, dass mit Ausnahme des B2-Referenzszenarios alle untersuchten Szenarios eine deutliche Entwicklung hin zu kohlenstofffreien Energiesystemen zeigen. Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Szenarios werden im Folgenden genauer beschrieben.

STROM-WASSERSTOFF-WIRTSCHAFT DER CO₂-STABILISIERENDEN WELTEN

Trotz der prinzipiellen Unterschiede in den zugrunde liegenden Annahmen zeigen die CO₂-stabilisierenden Szenarios grundlegende Übereinstimmungen: Während nicht nur der Primär-, sondern auch der Endenergiesektor heute noch von fossilen Energieträgern dominiert wird, entwickelt sich insbesondere in den CO₂-stabilisierenden Szenarios im Endenergiebereich eine Dominanz von Strom und Wasserstoff, also eine „Strom-Wasserstoff-Wirtschaft“. In den technologie-optimistischen Szenarios A1T*-450 und B1*-400 wird hierbei im Rahmen der IIASA-Modelle auch ein großer Teil des Stroms aus preiswert erzeugtem Wasserstoff gewonnen. Dagegen hält der WBGU eine direkte endenergetische Verwendung solar erzeugten Stroms im Rahmen eines welt-

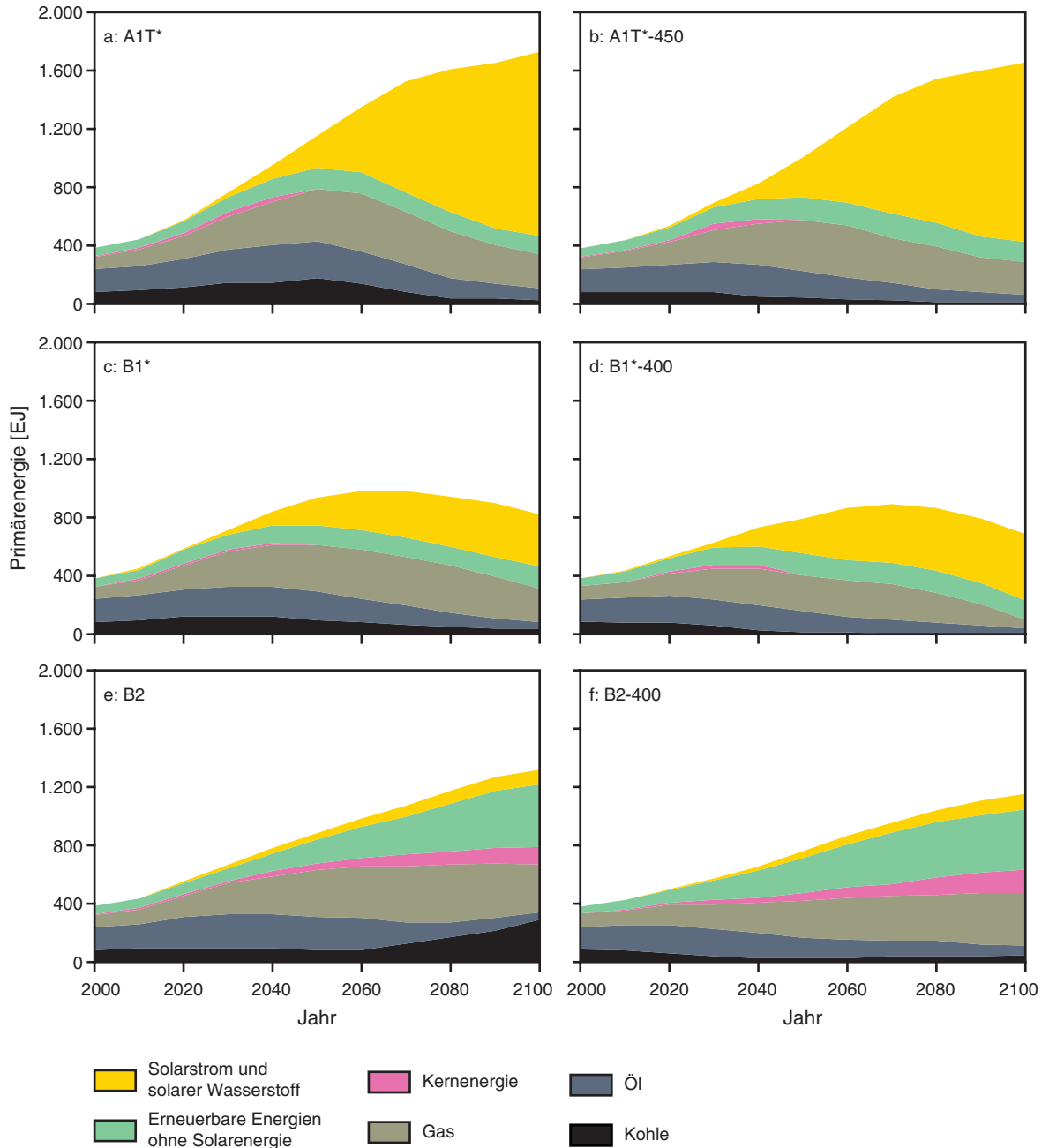


Abbildung 3.1-2

Primärenergieeinsatz nach Energieträgern in den IIASA-WBGU-Szenarios. Die Abbildung zeigt den Zeitverlauf des globalen Primärenergie-Portfolios in den untersuchten Referenzszenarios (a: A1T*, c: B1*, e: B2) sowie in den entsprechenden CO₂-stabilisierenden Szenarios (b: A1T*-450, d: B1*-400, f: B2-400). Es ist erkennbar, dass die Verringerung der Kohlenstoffintensität im fossilen Sektor durch eine verstärkte Nutzung von Gas auf Kosten von Öl und Kohle erfolgt. Insbesondere die Kohlenutzung läuft in allen CO₂-stabilisierenden Szenarios in der Mitte des Jahrhunderts nahezu aus (A1T*-450, B1*-400) oder verringert sich zumindest weitgehend (B2-400). Die Energieversorgung zum Ende des Jahrhunderts fußt insbesondere in A1T*/A1T*-450 und B1*/B1*-400 wesentlich auf solarer Elektrizität und solar erzeugtem Wasserstoff. Der Vergleich zwischen den Referenzszenarios (a, c, e) und den CO₂-stabilisierenden Szenarios (b, d, f) zeigt, dass die Auswahl der A1T- und B1-Storylines den für engagierten Klimaschutz benötigten Technologieportfolios entgegen kommt. Ähnliches gilt für die Emissionen (Abb. 3.1-4) und die Kosten (Abb. 3.1-7). Die Kategorie „erneuerbare Energien ohne Solarenergie“ enthält Biomasse, Windenergie, Wasserkraft, Solarthermie (nur Wärme), Geothermie und weitere erneuerbare Quellen.

Quelle: modifiziert nach Nakicenovic und Riahi, 2003b

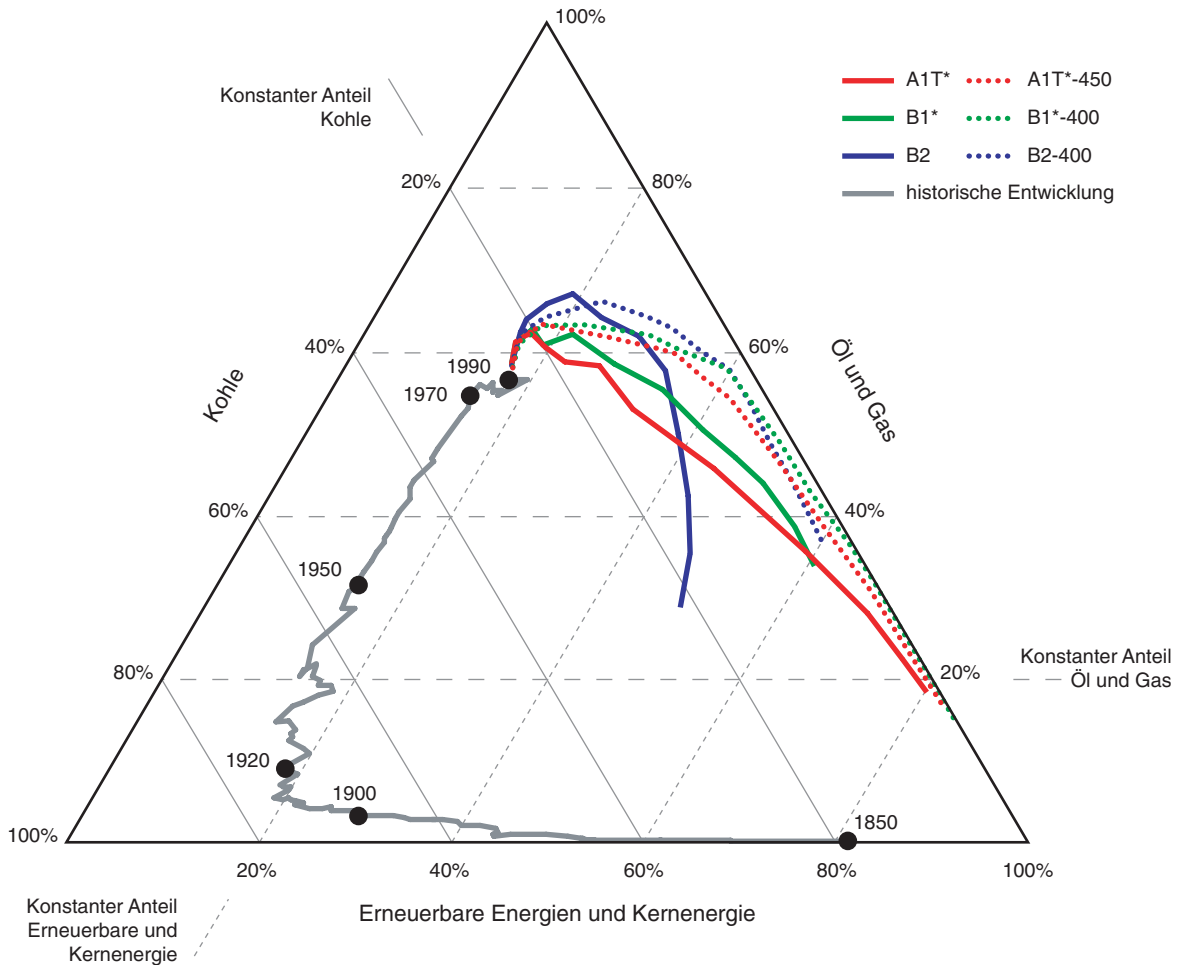


Abbildung 3.1-3

Anteile der Energieträger am globalen Primärenergieverbrauch als zeitliche Trajektorie bis 2100 in einem Dreieck zwischen den Eckpunkten Kohle, Öl und Gas sowie erneuerbare Energien und Kernenergie. Bis zum Jahr 1990 ist die historische Entwicklung gezeigt, anschließend spaltet sich die Trajektorie auf in die Entwicklungspfade der sechs Szenarios (A1T*, A1T*-450, B1*, B1*-400, B2, B2-400; Abb. 3.1-1). Mit Ausnahme des B2-Referenzszenarios zeigen alle untersuchten Szenarios eine deutliche Entwicklung hin zu kohlenstofffreien Energiesystemen.

Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003a

weiten Netzverbundes (Global Link) für wahrscheinlicher. Der Einstieg in die Strom-Wasserstoff-Wirtschaft vollzieht sich in allen CO₂-stabilisierenden Szenarios zunächst auf Basis fossiler Rohstoffe (z. B. Dampfreformierung von Erdgas), wobei die Kohlenstoffspeicherung an zentralen Energiekonversionsanlagen einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz darstellt. Die benötigten Konversionstechnologien zur Erzeugung von Strom und Wasserstoff aus fossilen Quellen sind heute bereits großtechnisch verfügbar, was den Einstieg in diesen Strukturwandel erleichtert. Eine wichtige Rolle kommt dem rechtzeitigen Umbau des emissionsintensiven Transportsektors zu: Hier ist die Entwicklung batterie- und wasserstoffbetriebener Fahrzeuge zu verstärken. Dafür ist eine – wenn auch zunächst fossil-basierte –

rasche Etablierung der entsprechenden Elemente einer Strom-Wasserstoff-Wirtschaft unerlässlich. Langfristig sind noch weiter gehende Veränderungen bei der Energiebereitstellung in der Strom-Wasserstoffwirtschaft der Szenarios zu verzeichnen: Während in der technologisch eher konservativen B2-400-Welt lediglich die Vergasung von Biomasse als zusätzliche Wasserstoffquelle und die verstärkte Nutzung von Kernenergie als Elektrizitätsquelle hinzukommen, übernimmt in den technologisch sehr dynamischen A1T*-450- und B1*-400-Szenarios die Solarenergie den wesentlichen Anteil der Strom- und Wasserstoffbereitstellung. Die entsprechenden zeitlichen Entwicklungen der Technologieportfolios sind dabei stark durch die WBGU-Leitplanken nachhaltiger Energiepolitik geprägt (Kap. 3.1.1).

GEMEINSAMKEITEN UND UNTERSCHIEDE BEI DER PRIMÄRENERGIE-BEREITSTELLUNG

Im Rahmen einer detaillierteren Betrachtung der zeitlichen Entwicklung des Umfangs einzelner Primärenergieträger offenbaren sich langfristige Gemeinsamkeiten zwischen den technologie-optimistischen A1T*-450- und B1*-400-Szenarios, während sich gleichzeitig die prinzipiellen Unterschiede zum B2-400-Szenario zeigen: Die Kernenergie übernimmt in B2-400 eine dominante Rolle, während sie in A1T*-450 und B1*-400 mittelfristig aus Gründen der Nachhaltigkeit (Kap. 3.1.1) ausläuft. Ebenso steigt die Nutzung der Biomasse in B2-400 langfristig auf ein extremes Maß von über 300 EJ pro Jahr an, während sie in den nachhaltigen Energiesystemen von A1T*-450 und B1*-400 unter der Obergrenze einer nachhaltigen Nutzung (100 EJ pro Jahr) verbleibt. Die Solarenergie übernimmt in A1T*-450 und B1*-400 langfristig den größten Anteil der Energieversorgung der Strom-Wasserstoff-Wirtschaft, während sie in B2-400 auch langfristig eine untergeordnete Rolle spielt. Lediglich im Bereich der fossilen Energieträger sind die Trends in allen drei CO₂-stabilisierenden Szenarios ähnlich: Die notwendige Verringerung der Kohlenstoff-Intensität erfolgt durch eine verstärkte Nutzung von Gas auf Kosten von Öl und Kohle. Insbesondere die Kohlenutzung läuft in allen CO₂-stabilisierenden Szenarios in der Mitte des Jahrhunderts praktisch aus (A1T*-450, B1*-400) oder verringert sich zumindest weitgehend (B2-400). Dafür sind im Wesentlichen zwei ökonomische Gründe verantwortlich: Zum einen kann Wasserstoff kostengünstiger aus Erdgas als aus Kohle gewonnen werden. Zum anderen gilt auch bei unbegrenzt zugelassener geologischer Kohlenstoffspeicherung, dass der bei Kohle gegenüber Gas höhere spezifische Anfall von CO₂ sowohl bei der Speicherung als auch bei der kostenpflichtigen Emission des aus technologischen Gründen nicht abtrennbaren Restabgases zu ökonomischen Nachteilen führt. Lediglich in Weltregionen mit erheblichen, kostengünstig gewinnbaren Kohlereserven (z. B. China) ist für einige Dekaden übergangsweise ein weiterer Anstieg der Kohlenutzung zu verzeichnen.

3.1.2.3

Ergebnisse: Emissionen und resultierender Klimawandel

Abbildung 3.1-4 zeigt die Emissionspfade aller drei CO₂-stabilisierenden Szenarios im Vergleich zu den entsprechenden Referenzszenarios.

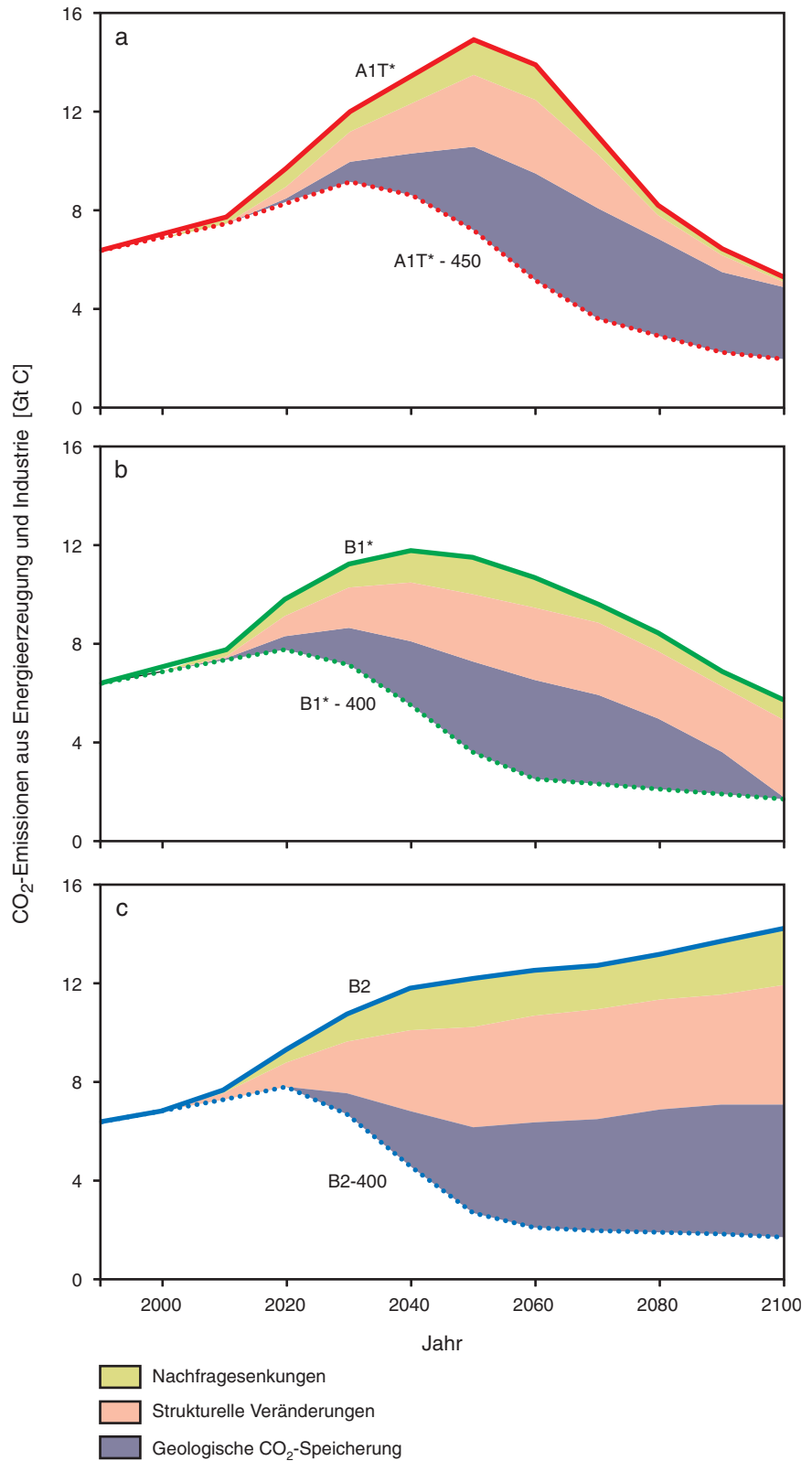
Nur die energiebedingten und industriellen Treibhausgase in den IIASA-Modellen waren Teil der endogenen makroökonomischen Optimierung bei

der Erstellung der CO₂-stabilisierenden Szenarios. Daher wurden die Emissionsprofile nicht erfasster anthropogener Treibhausgase auf Basis äquivalenter Stabilisierungsszenarios exogen vorgegeben.

Abbildung 3.1-4 teilt die Emissionen, die in den CO₂-stabilisierenden Szenarios gegenüber den Referenzszenarios vermieden werden, in drei Kategorien ein: Nachfragesenkungen infolge höherer Preise, strukturelle Veränderungen (insbesondere verstärkter Einsatz erneuerbarer Energiequellen und kohlenstoffarmer konventioneller Energieträger) sowie geologische Kohlenstoffspeicherung. Verbesserungen der Energieeffizienz teilen sich dabei auf die ersten beiden Kategorien auf. Die gezeigten Emissionsminderungen beziehen sich ausschließlich auf die energiebedingten und industriellen CO₂-Emissionen. Der Beitrag der Nachfragesenkung ist in allen Szenarios vergleichsweise klein, da die Klimaschutz induzierten zusätzlichen Energiekosten im Vergleich zu den Referenzszenarios moderat sind (Abb. 3.1-1). Der Beitrag der Kohlenstoffspeicherung ist hingegen bedeutend und bleibt auch am Ende des Jahrhunderts groß, wenn er nicht exogen beschränkt wird, wie in B1*-400. Dennoch bleibt der insgesamt gespeicherte Kohlenstoff in allen drei Szenarios bis 2100 unterhalb der vom WBGU als tolerabel angesehenen Obergrenze von 300 GtC. Problematisch sind die Modellergebnisse für die Kohlenstoffspeicherung dennoch in A1T*-450 und B2-400, da die am Ende des Jahrhunderts nach wie vor signifikanten Raten der Kohlenstoffspeicherung im Laufe des nächsten Jahrhunderts zur Verletzung der tolerablen Obergrenze sicherer geologischer Lagerung zu führen drohen. Diese Ergebnisse ergeben sich aus den ökonomischen Annahmen der zugrunde liegenden Modelle. Der WBGU ist der Ansicht, dass die CO₂-Erzeugung und -Speicherung von der Politik so gesteuert werden sollte, dass die CO₂-Speicherung in 2100 global beendet wird. Dabei darf es sich bei der in den Szenarios enthaltenen Kohlenstoffspeicherung nicht um eine Maßnahme zur Festschreibung eines fossilen Pfads handeln. Sie erscheint in Abb. 3.1-4 insbesondere deswegen vergleichsweise großskalig, weil ein wesentlicher Anteil struktureller Umbaumaßnahmen (erneuerbare Energien, Effizienzsteigerung usw.) bereits in den Referenzszenarios enthalten ist (Abb. 3.1-1). Die Kohlenstoffspeicherung in den nachhaltigen CO₂-stabilisierenden Szenarios ist zu wesentlichen Teilen mit der Nutzung von Erdgas und Biomasse verbunden und nicht mit Technologien, die auf Kohle basieren.

Allen drei CO₂-stabilisierenden Szenarios ist gemein, dass die jährlichen CO₂-Emissionen am Ende des betrachteten Zeitraums noch immer sinken. Um eine langfristige Stabilisierung im Sinn von Art. 2 UNFCCC zu gewährleisten, müssen die Emis-

Abbildung 3.1-4
 Unterschiede in den Emissionen zwischen den Referenzszenarios und den CO₂-stabilisierenden Szenarios (a: A1T-Storyline; b: B1-Storyline; c: B2-Storyline). Die vermiedenen Emissionen werden in drei Kategorien eingeteilt: Nachfragesenkungen, strukturelle Veränderungen sowie geologische CO₂-Speicherung. Nomenklatur der Szenarios wie in Abb. 3.1-1.
 Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003b



sionen auch nach 2100 weiter reduziert werden. Langfristig (im Zeitraum von mehreren Jahrhunderten) müssen sie auf ein so niedriges Niveau zurückgeführt werden, dass sie durch persistente natürliche Senken aufgenommen werden können. Diese werden als sehr gering eingeschätzt (0,2 GtC pro Jahr) (IPCC, 2001a).

ANNAHMEN ZU ANDEREN QUELLEN UND TREIBHAUSGASEN

Für die Berechnung der Klimawirkungen der CO₂-stabilisierenden Szenarios wurden folgende Annahmen zu den CO₂-Emissionen aus Landnutzungsänderung sowie zu den anderen Treibhausgasen gemacht:

- Die Emissionen aus Landnutzungsänderung (hauptsächlich Entwaldung in Entwicklungsländern) wurden unverändert aus den jeweiligen Referenzpfaden übernommen.

- Die Emissionen der anderen Treibhausgase wurden aus anderen vergleichbaren CO₂-stabilisierenden Szenarios übernommen. Die Emissionen von Methan, Lachgas sowie Ozon-Vorläufersubstanzen (NO_x, VOCs, CO) entsprechen dabei dem von Swart et al. (2002) entwickelten Szenario. Die Emissionen der PFKW, HFKW und SF₆ wurden von Rao und Riahi (2003) übernommen.

Abb. 3.1-5 zeigt die Annahmen zu CO₂-Emissionen aus Landnutzungsänderung sowie zu den anthropogenen Methanemissionen für die einzelnen Szenarios (IPCC, 2000; Swart et al., 2002).

Landnutzungsänderungen führen einerseits zu Emissionen (etwa Entwaldung hauptsächlich in den Tropen) oder zur Aufnahme von Kohlendioxid (etwa Aufforstung). Dargestellt ist der globale Nettoeffekt aller Landnutzungsänderungen. Für B1 und B2 ist dieser bereits ab etwa 2030 negativ, für A1T ab etwa 2050, d.h. von diesem Zeitpunkt an übersteigt die

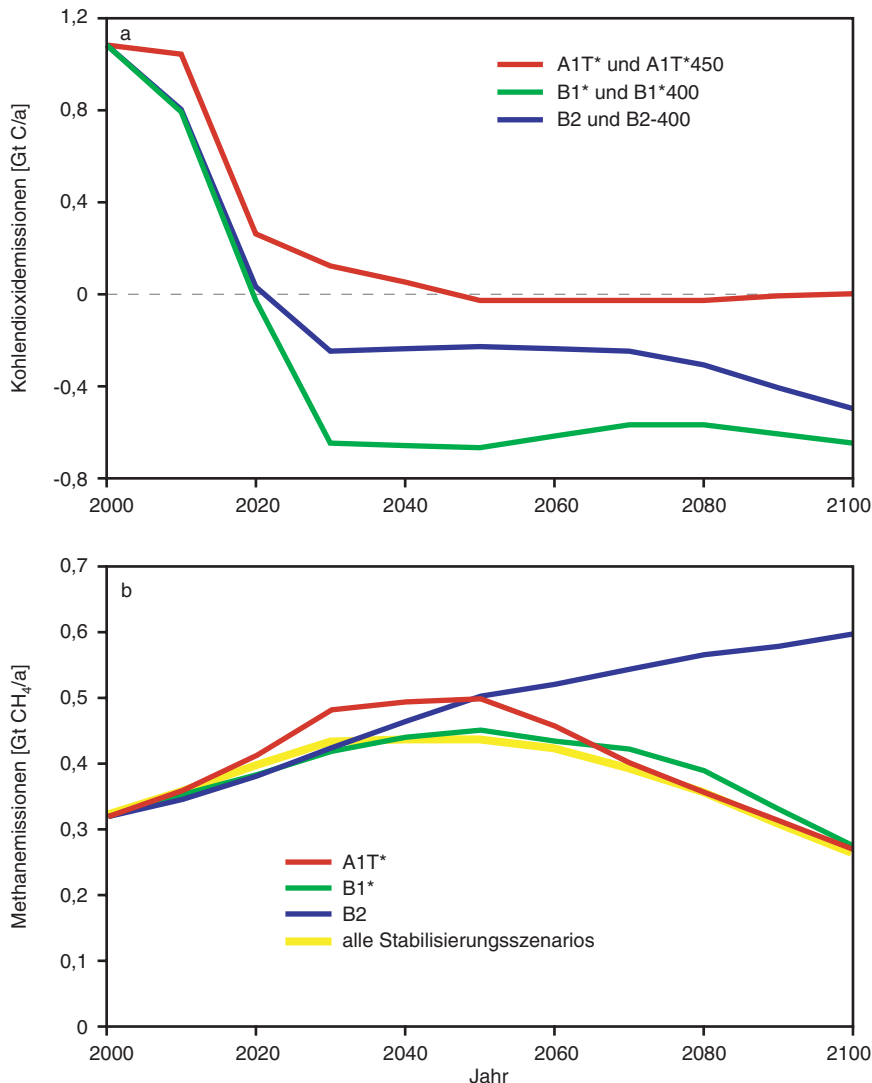


Abbildung 3.1-5
 a: CO₂-Emissionen aus Landnutzungsänderung in den Referenzszenarios und in den CO₂-stabilisierenden Szenarios. Es wurde angenommen, dass die CO₂-Emissionen aus Landnutzungsänderung in den CO₂-stabilisierenden Szenarios unverändert gegenüber den Referenzszenarios bleiben. Landnutzungsänderungen führen einerseits zu Emissionen (etwa Entwaldung hauptsächlich in den Tropen) oder zur Aufnahme von CO₂ (etwa Aufforstung). Dargestellt ist der globale Nettoeffekt aller Landnutzungsänderungen.
 b: Anthropogene Methanemissionen aus allen Quellen (Energie, Industrie, Landwirtschaft) in den Referenzszenarios und in den CO₂-stabilisierenden Szenarios. Für Methan (CH₄) wie für andere Treibhausgase wurden einheitliche Emissionsminderungspfade für alle CO₂-stabilisierenden Szenarios angenommen. Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003b

Aufnahme von CO_2 durch Aufforstung die Emissionen aus Entwaldung.

Die anthropogenen Methanemissionen stammen heute zur Hälfte aus der Landwirtschaft und zu einem Viertel aus der Extraktion, dem Transport und der Verteilung fossiler Brennstoffe. Eine wichtige Quelle ist auch die Abfallbehandlung. Die Abschätzung zukünftiger Methanemissionen hängt einerseits von Annahmen zur zukünftigen Nutzung fossiler Brennstoffe ab, andererseits von Annahmen zur Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung und landwirtschaftlichen Praktiken sowie Ernährungsgewohnheiten (IPCC, 2000).

Abb. 3.1-6 zeigt die mit dem einfachen Klimamodell MAGICC berechnete, aus allen emittierten Treibhausgasen folgende Temperaturentwicklung relativ zu vorindustriellen Werten (angenommene Klimasensitivität: $2,5^\circ\text{C}$) sowie den Anstieg des Meeresspiegels relativ zum Jahr 2000. Ebenso sind

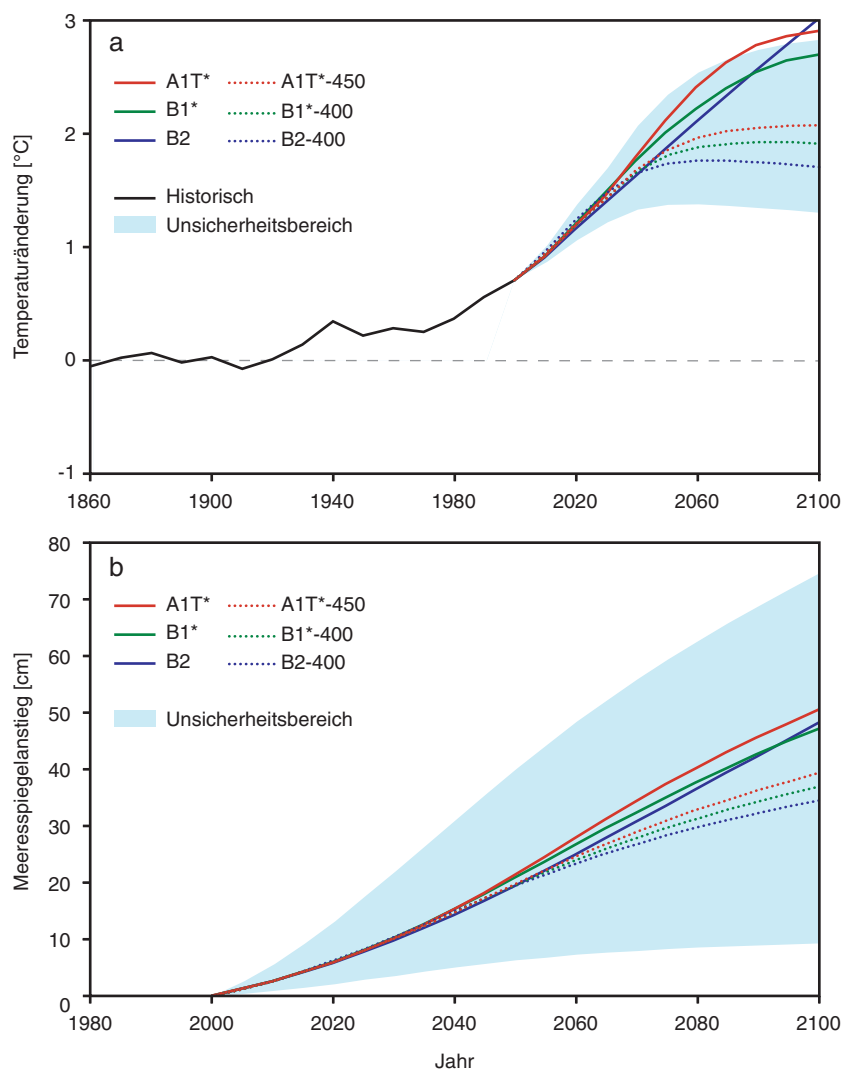
Unsicherheitsbereiche der Modelle unter Berücksichtigung eines Klimasensitivitätsbereiches zwischen $1,5^\circ\text{C}$ und $4,5^\circ\text{C}$ skizziert.

Die trotz identischem CO_2 -Stabilisierungsniveau verschiedene Temperaturentwicklung in B1*-400 und B2-400 geht im Wesentlichen auf unterschiedliche energiebedingte SO_x -Emissionen zurück.

Das Maß der Absicherung gegenüber Klimaänderungen kann man ausdrücken durch den Wert der Klimasensitivität, der in einem Szenario zu einer langfristigen Temperaturerhöhung von nicht mehr als 2°C gegenüber vorindustriellen Zeiten führen würde: Je höher der Wert, umso sicherer das Szenario. Aus den Modellrechnungen ergeben sich Werte von $2,0^\circ\text{C}$ für A1T*-450, $2,4^\circ\text{C}$ für B1*-400 und $2,9^\circ\text{C}$ für B2-400, stabilisierte CO_2 -Emissionen und konstante Emissionen anderer Treibhausgase nach 2100 vorausgesetzt.

Abbildung 3.1-6

a: Temperaturänderung relativ zum vorindustriellen Mittelwert;
 b: resultierender Meeresspiegelanstieg relativ zum Jahr 2000.
 Die Klimasensitivität wurde mit $2,5^\circ\text{C}$ angenommen. Der blau schattierte Bereich gibt die Modellunsicherheiten für die CO_2 -stabilisierenden Szenarios wieder. Neben anderen Unsicherheiten wurde hier insbesondere ein Bereich für die Klimasensitivität von $1,5^\circ\text{C}$ bis $4,5^\circ\text{C}$ angesetzt. Die Temperaturentwicklung zeigt für alle CO_2 -stabilisierenden Szenarios eine geringfügige, auf die ersten vier Dekaden des Jahrhunderts beschränkte Überschreitung der im WBGU-Klimafenster definierten Obergrenze von $0,2^\circ\text{C}$ pro Jahrzehnt.
 Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003b



Wären in den Szenarios die nicht energiebedingten, nicht industriellen Emissionen, die auf Basis äquivalenter Stabilisierungsszenarios exogen vorgegeben wurden, unverändert aus den Referenzläufen übernommen worden (Klimaschutz ausschließlich im Energiesektor), so wäre für 2100 eine signifikante zusätzliche Erwärmung zu verzeichnen. Bei einer Klimasensitivität von $2,5^{\circ}\text{C}$ betrüge diese zusätzliche Erwärmung $0,2^{\circ}\text{C}$ (A1T*-450), $0,04^{\circ}\text{C}$ (B1*-400) bzw. $0,2^{\circ}\text{C}$ (B2-400). Der niedrige Wert des B1*-400-Szenarios erklärt sich durch die bereits im Referenzszenario sehr niedrigen Emissionen entsprechender Treibhausgase. Insgesamt wird deutlich, dass nicht energiebedingte Emissionen von CO_2 , Methan und Lachgas aus technischen und biologischen Quellen ebenfalls Gegenstand von Klimaschutzanstrengungen sein müssen.

3.1.2.4

Ergebnisse: Kosten des Klimaschutzes

Während die regionale Verteilung der Kosten des Klimaschutzes in Kapitel 3.2 ausführlich behandelt wird, sollen an dieser Stelle die globalen Gesamtkosten skizziert werden. Hierzu wurden die relativen Verluste des weltweiten BIP ausgewählt, also das BIP der drei CO_2 -stabilisierenden Szenarios, bezogen auf das BIP des jeweiligen Referenzszenarios. Die Ergebnisse zeigt Abb. 3.1-7.

Die dargestellten Effekte reflektieren die makroökonomischen Auswirkungen infolge der durch Klimaschutz-Aktivitäten erhöhten Energiesystemkosten (diskontierte Investitionen plus laufende Betriebskosten). Bei der Bewertung ist zu berücksichtigen, dass die Referenzszenarios A1T* und B1*

hinsichtlich der Technologie-Portfolios bereits sehr nahe bei den CO_2 -stabilisierenden Szenarios liegen. Die gezeigten BIP-Verluste müssen vor dem Hintergrund interpretiert werden, dass auch die in den Referenzszenarios nicht enthaltenen externen Kosten einer Klimaänderung (Klimaschäden und Anpassungskosten) in den CO_2 -stabilisierenden Szenarios zum großen Teil vermieden werden. Die Kosten der CO_2 -Stabilisierung scheinen langfristig unter den Anpassungs- und Schadenskosten zu liegen (Kap. 2.1 und 3.3). Auch werden andere Schäden vermieden, etwa durch Luftverschmutzung und Krankheiten.

Die BIP-Verluste sind in allen CO_2 -stabilisierenden Szenarios im Jahr 2050 am größten, bleiben aber deutlich unterhalb von 3% des globalen BIP (Abb. 3.1-7). Für A1T*-450 und B1*-400 liegen die BIP-Verluste unter 1,5%, im Mittel unter 0,7%. Anschließend gehen in A1T*-450 und B1*-400 die relativen BIP-Verluste bis zum Ende des Jahrhunderts beinahe auf Null zurück, während sie in B2-400 auf signifikantem Niveau verharren.

Der Kostenvergleich der CO_2 -stabilisierenden Szenarios mit den jeweiligen Referenzszenarios zeigt insgesamt, dass Klimaschutz in den A1T*- und B1*-Welten einfacher als in der B2-Welt zu realisieren ist. Das lässt sich durch die verwendeten Storylines der Referenzszenarios erklären. Dieser Sachverhalt kann als Aufforderung an die Politik gewertet werden, Klimaschutzbestrebungen u. a. auf die zentralen Elemente der A1T*- und B1*-Storylines zu gründen. Hierzu zählen beispielsweise Technologietransfer in Entwicklungsländer, Stärkung der internationalen Zusammenarbeit, ehrgeizige Forschungsförderung bzgl. Energiequellen und -effizienz sowie Investitionen in Technologieentwicklung und -anwendungen.

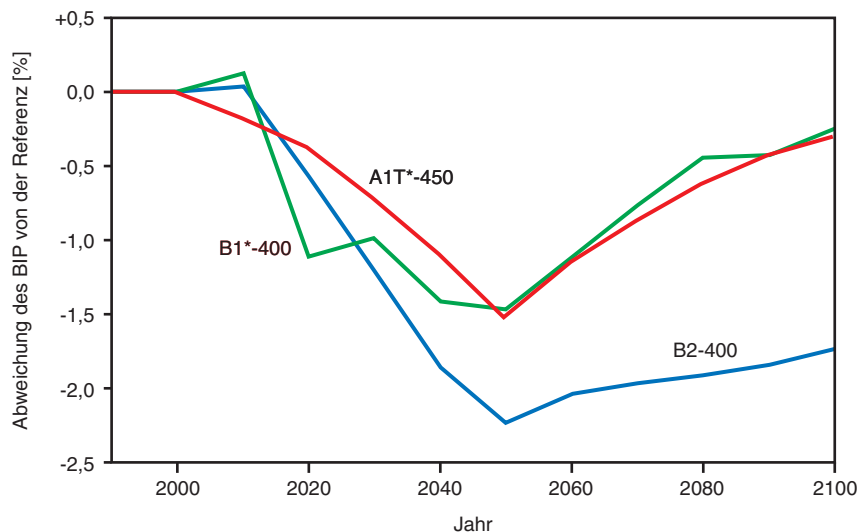


Abbildung 3.1-7

Relative Verluste des globalen Bruttoinlandsproduktes (BIP) durch Klimaschutzmaßnahmen (BIP der CO_2 -stabilisierenden Szenarios bezogen auf das BIP des jeweiligen Referenzszenarios). Die Auswahl der A1T*- und B1*-Storylines erweist sich auch unter Kostenaspekten als vorteilhaft. Ähnliches gilt für die Emissionen (Abb. 3.1-4) und die Primärenergiebereitstellung (Abb. 3.1-2).

Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003b

In den untersuchten Szenarios zeigt sich zudem, dass sowohl die regionalen Strukturen des Energiesystems als auch die globalen Gesamtkosten von der Wahl des Konvergenzjahres (2050 oder 2100) unabhängig sind, solange ein Emissionshandelssystem für eine Minimierung der globalen Kosten sorgt. Ohne den Emissionshandel wäre zu erwarten, dass sich in bestimmten Regionen das Energiesystem strukturell deutlich anders entwickeln würde.

3.2

Analyse: Verringerung und Konvergenz in ausgewählten Szenarios

Im folgenden Kapitel soll analysiert werden, welche Implikationen mit der Zuteilung von Rechten am globalen CO₂-Emissionsbudget auf die einzelnen

Länder bzw. Regionen verbunden sind. Betrachtet wird dabei das Modell der Verringerung und Konvergenz (Contraction and Convergence – C&C; Kap. 2.3). Zum Vergleich stehen die Ergebnisse der von IIASA berechneten Szenarios (Nakicenovic und Riahi, 2003a, b; zur Nomenklatur der Szenarios siehe Abb. 3.1-1), die für die Konvergenzjahre 2050 und 2100 berechnet wurden. Die Berechnungen sind für 11 aggregierte Weltregionen aufgelöst, die in Abb. 3.2-1 zusammen mit einer weiteren Aggregationsstufe zu vier Makroregionen dargestellt sind. Es wurde von einer linearen Konvergenz ausgegangen und kein Stichjahr für die Bevölkerungsentwicklung festgelegt (Kap. 2.3). Bei der Berechnung der Emissionen wurde angenommen, dass die USA an der ersten Verpflichtungsperiode des Kioto-Protokolls nicht teilnehmen, ab 2012 aber anteilig Reduktionsverpflichtungen übernehmen.

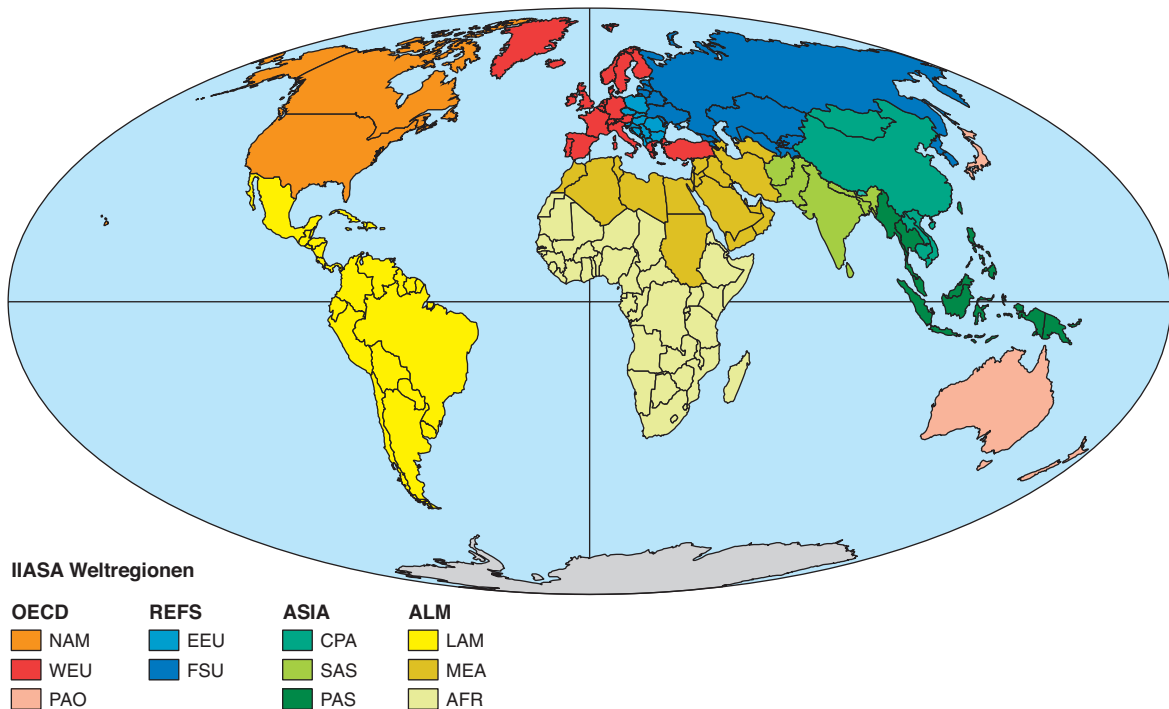


Abbildung 3.2-1

Von IIASA in den Szenarios verwendete Aufteilung der Welt in Regionen.

- OECD: NAM – Nordamerika (USA, Kanada)
 WEU – Westeuropa (inkl. Türkei)
 PAO – Pazifische OECD-Staaten (Japan, Neuseeland, Australien)
- REFS: EEU – Zentral- und osteuropäische Staaten
 FSU – Neue unabhängige Staaten der früheren Sowjetunion
- ASIA: CPA – Planwirtschaftlich organisiertes Asien sowie China
 SAS – Südasien (inkl. Indien)
 PAS – Andere Staaten in Asien bzw. Pazifik
- ALM (Afrika, Lateinamerika, mittlerer Osten):
 LAM – Lateinamerika und die Karibik
 AFR – Staaten südlich der Sahara
 MEA – Mittlerer Osten und Nordafrika

Quelle: Nakicenovic et al., 1998

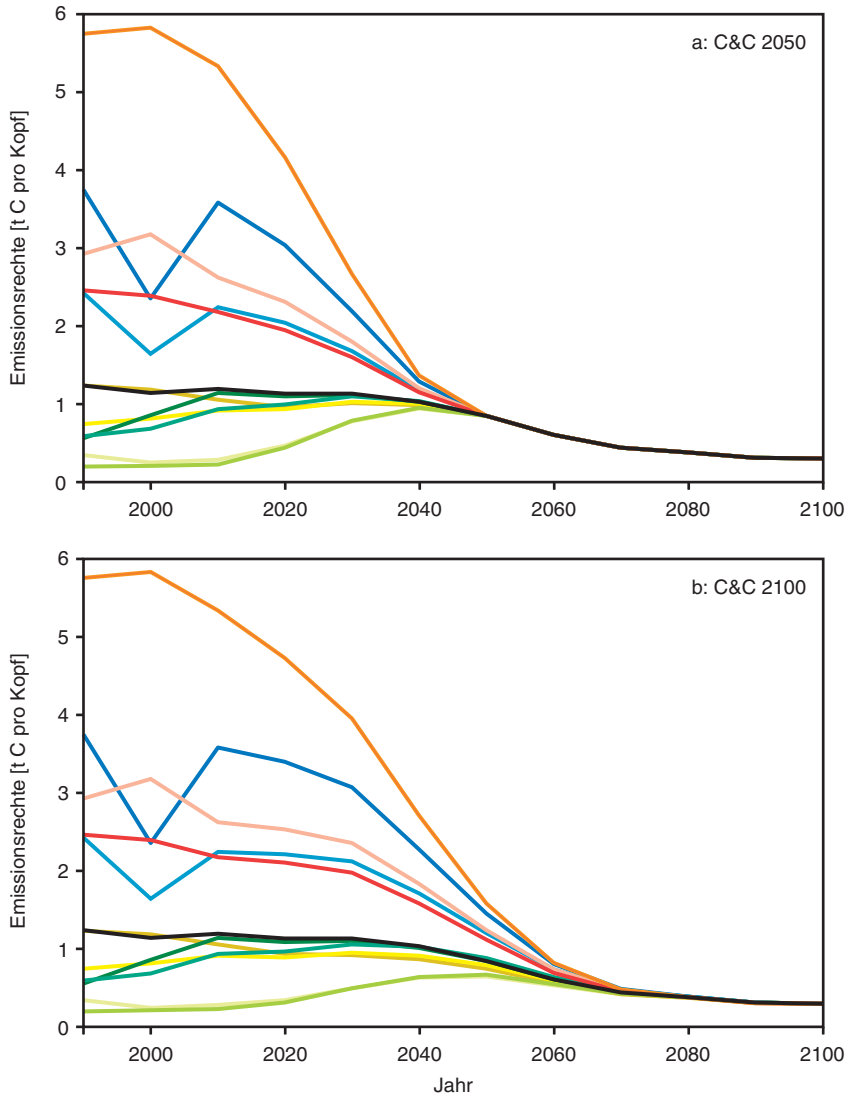


Abbildung 3.2-2
 Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionsrechte bei Verringerung und Konvergenz mit dem Zieljahr 2050 (a: C&C 2050) und 2100 (b: C&C 2100), exemplarisch für A1T*-450. Die Verläufe für B1*-400 und B2-400 sich ähnlich, aber auf leicht niedrigerem Niveau. Die Werte bis 2010 leiten sich aus den Verpflichtungen der ersten Verpflichtungsperiode des Kioto-Protokolls bzw. dem Referenzpfad her. Nomenklatur der Regionen wie in Abb. 3.2-1. Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003b

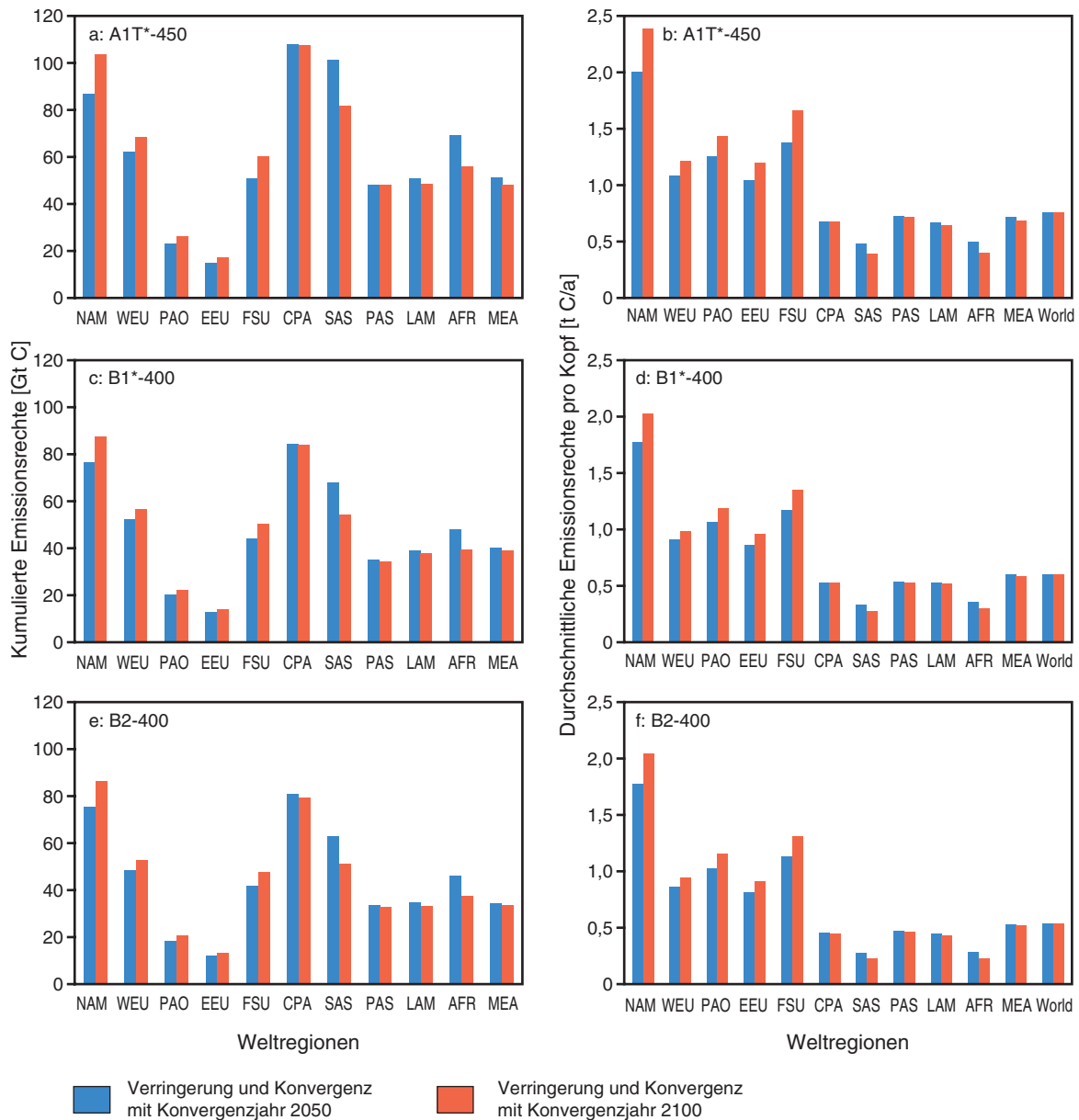
3.2.1 Regionale Zuteilung der Emissionsrechte

Mit einer Zuteilung der Emissionsrechte nach dem Modell der Verringerung und Konvergenz geht je nach gewähltem Konvergenzjahr eine mehr oder minder schnelle Angleichung der Pro-Kopf-Emissionsrechte in allen Ländern bzw. Regionen einher (Abb. 3.2-2).

Der größte Unterschied zwischen den Szenarios mit unterschiedlichem Konvergenzjahr (2050 bzw. 2100) besteht vor allem darin, dass im Verleich zu 2050 die langsamere Annäherung bis 2100 die Industrie- und Transformationsländer in ihren Reduktionsverpflichtungen entlastet. Entsprechend weniger Emissionsrechte werden den Entwicklungsländern zugesprochen, so dass für viele kaum Spielraum für einen Anstieg der Pro-Kopf-Emissionen verbleibt.

Bis 2050 konvergierende Reduktionsszenarios dagegen bedeuten vor allem für Afrika südlich der Sahara und Südasien inkl. Indien mehr Emissionsrechte – insbesondere in der Mitte des Jahrhunderts. Analog verfügen die Industrie- und Transformationsländer in diesem Szenario schon zu Beginn des Konvergenzprozesses über vergleichsweise geringere Emissionsrechte.

Dieser Effekt zeigt sich auch in der Betrachtung der von 2000 bis 2100 kumulierten, regionalen Emissionsrechte und der gemittelten regionalen, jährlichen Pro-Kopf-Emissionsrechte (Abb. 3.2-3). Vor allem die Darstellung der gemittelten Pro-Kopf-Emissionsrechte (Abb. 3.2-3 b, d, f) veranschaulicht die gleichzeitige Berücksichtigung des Gleichheitsprinzips und des Prinzips der Stetigkeit (Kap. 2.3). So erhalten durch die verzögerte Konvergenz Industrie- und Transformationsländer in Folge ihres hohen Aus-

**Abbildung 3.2-3**

Kumulierte Emissionsrechte von 2000 bis 2100 (a, c, e) und durchschnittliche jährliche Pro-Kopf-Emissionsrechte von 2000 bis 2100 (b, d, f) im Vergleich von Verringerung und Konvergenz mit dem Zieljahr 2050 bzw. 2100 für die verschiedenen Weltregionen. Nomenklatur der Regionen wie in Abb. 3.2-1 und der Szenarios wie in Abb. 3.1-1.

Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003b

gangsniveaus im Durchschnitt mehr Emissionsrechte pro Kopf als die Entwicklungsländer.

Abbildung 3.2-4 zeigt die Entwicklung der Emissionsrechte ausgewählter Regionen für die Referenzpfade sowie für die Reduktionsszenarios von A1T*, B1* und B2, einmal mit 2050, das andere Mal mit 2100 als Konvergenzjahr. Es wird deutlich, dass die Verläufe von Industrie-, Transformations- und Entwicklungsländern stark voneinander abweichen,

innerhalb der Industrie- bzw. Entwicklungsländer jedoch ähnlich sind.

Auffällig sind die hohen Emissionen des Referenzpfades des B2-Szenarios, die sich mit der geringen technologischen Dynamik der Storyline und entsprechend niedrigen Fortschritten in der Energieproduktivität erklären lassen. Nur Westeuropa und Nordamerika zeigen diesen Trend nicht. Die Region der ehemaligen Sowjetunion verfügt nur bis 2020 über „überschüssige“ Emissionsrechte, d.h. über

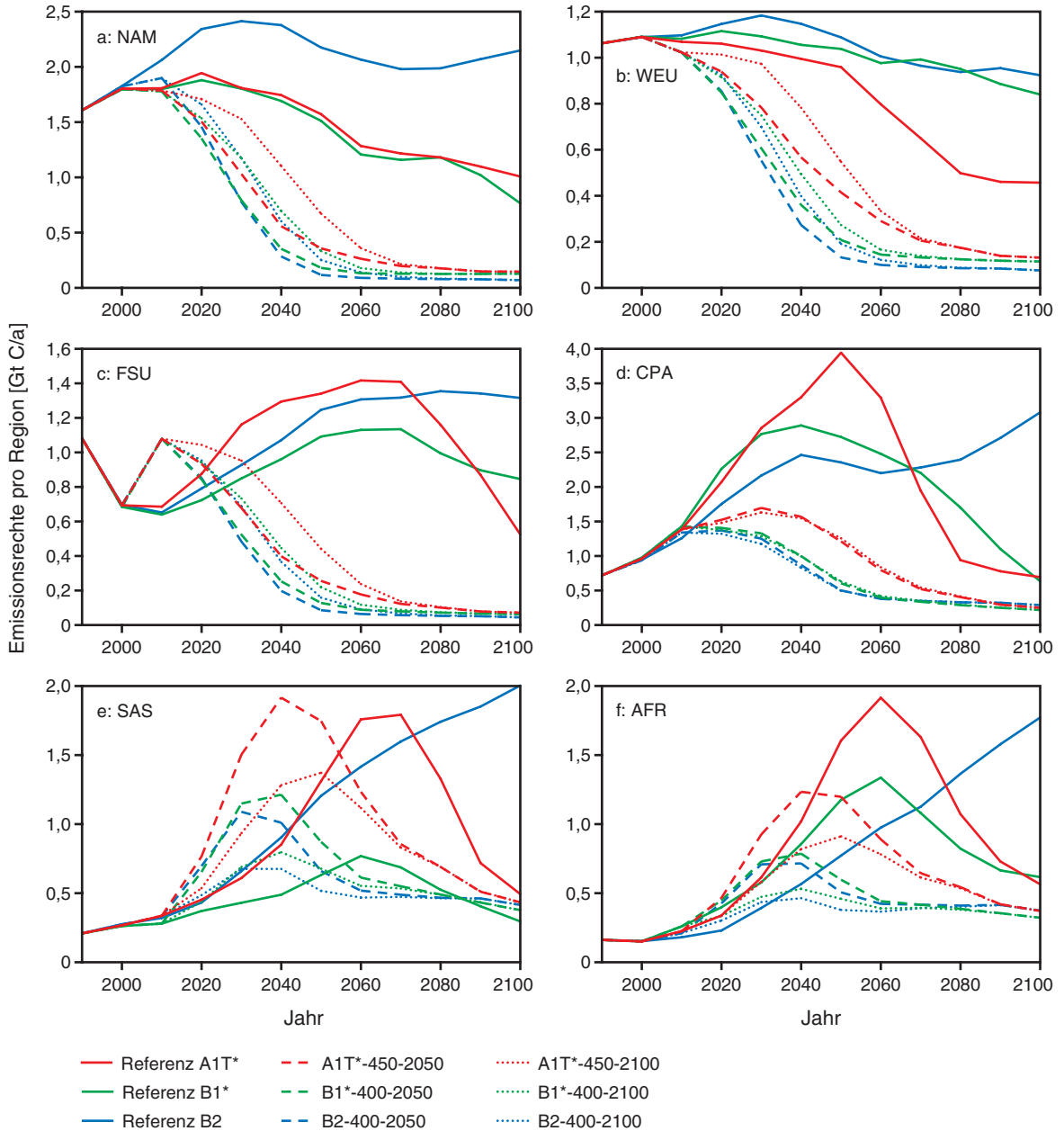


Abbildung 3.2-4

Überblick über die Entwicklung der Emissionsrechte für ausgewählte Regionen und alle Szenarios für beide Konvergenzjahre 2050 und 2100. Nomenklatur der Regionen wie in Abb. 3.2-1 und der Szenarios wie in Abb. 3.1-1.

Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003b

Rechte für größere Mengen an CO₂-Emissionen als im Referenzszenario getätigt würden, und ist anschließend in allen Reduktionsszenarios mit auffallend hohen Reduktionsverpflichtungen konfrontiert. Für das planwirtschaftlich organisierte Asien und China bestehen ähnlich große Unterschiede in den A1T*-450-Szenarios. Die Emissionsrechte für das planwirtschaftlich organisierte Asien und China ent-

wickeln sich in den Reduktionsszenarios relativ unabhängig vom Konvergenzjahr. Dieser Effekt lässt sich jedoch für keine weitere Region feststellen (Abb. 3.2-3 und 3.2-4). Abhängig vom Basisszenario und Konvergenzjahr besitzen insbesondere die Regionen Südasien inklusive Indien und Afrika südlich der Sahara bis zur Mitte des Jahrhunderts „überzählige“ Emissionsrechte. Für Afrika südlich der

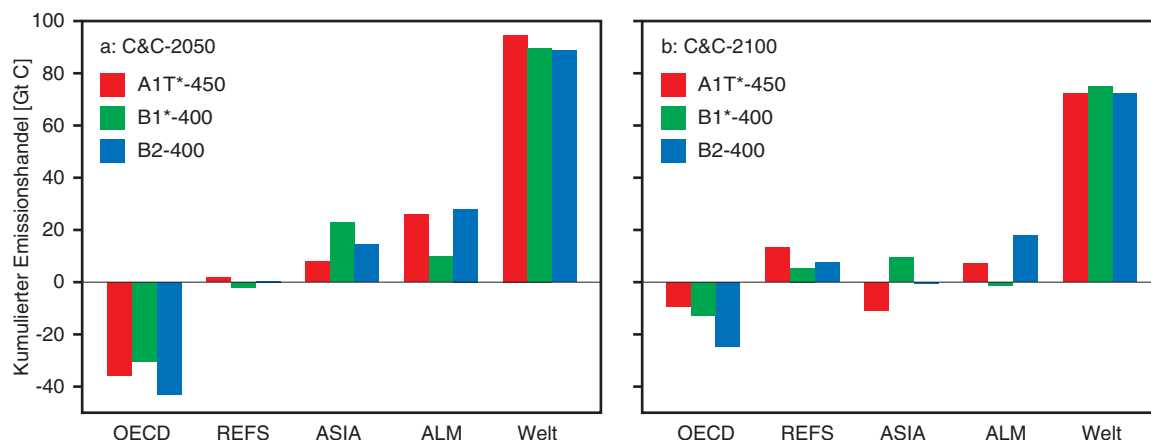


Abbildung 3.2-5

Bis 2100 kumulierter Emissionshandel in den Stabilisierungsszenarios. a: Konvergenz 2050, b: Konvergenz 2100. Nomenklatur der Regionen wie in Abb. 3.2-1 und der Szenarios wie in Abb. 3.1-1.

Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003a

Sahara versiegt dieser „Überschuss“ dabei in den Szenarios A1T*-450 und B1*-400 schon früher, vor allem bei einem Konvergenzjahr 2100 (bis zu vier Dekaden in B1*-400-2100).

3.2.2

Voraussichtlicher Emissionshandel

Unverzichtbar, um den Ansatz der Verringerung und Konvergenz ohne untragbare wirtschaftliche Folgen zu realisieren, ist der weltweite Handel mit zugeteilten Emissionsrechten (Kap. 5). Er wird insbesondere bis zur Mitte des Jahrhunderts den Entwicklungsländern zugute kommen (Kap. 3.2.3).

Zum einen haben die meisten Entwicklungsländer ein niedriges Ausgangsniveau der Emissionen in ihren Referenzszenarios. Zum anderen besitzen insbesondere Lateinamerika, Afrika südlich der Sahara und Südasiens große Potenziale für den Ausbau solarer Energien und von Biomasse. Durch den verstärkten Einsatz von solarem Wasserstoff und emissionsmindernden Technologien wie der Kohlenstoffspeicherung bei Biomasseverwertungsanlagen, welche in den Stabilisierungsszenarios zum Teil aus den Einkünften aus dem Emissionshandel bezahlt werden, können diese Regionen weit unterhalb der ihnen zugeteilten Menge an Emissionszertifikaten bleiben. Insbesondere in den bis 2050 konvergierenden Reduktionsszenarios verfügen diese Regionen (Asien, Afrika und Lateinamerika) dann über die Möglichkeit, große Mengen an Emissionszertifikaten in die OECD-Länder zu verkaufen (Abb. 3.2-5).

Verschiebt man das Konvergenzjahr von 2050 auf 2100 werden den Ländern der OECD größere Mengen an Emissionsrechten zugeteilt und den Entwick-

lungsländern entsprechend kleinere Mengen. Dies führt zu einem Rückgang des globalen Handelsvolumens der Emissionszertifikate (Abb. 3.2-5).

Im Zeitvergleich bestehen große Unterschiede in den Handelsströmen in allen Szenarios. Importe in die OECD-Länder weisen zwischen 2020 und 2050 eine Spitze auf, vor allem in der Mitte des Jahrhunderts, wenn besonders starke Änderungen bei der Transformation der Energiesysteme erforderlich sind und die Grenzkosten im Modell durch den schnellen Ausstieg aus Technologien stark ansteigen (Nakicenovic und Riahi, 2003a). Da emissionsfreie, den WBGU-Leitplanken entsprechende Technologien zu dem Zeitpunkt noch nicht in ausreichendem Umfang zu günstigen Preisen bereitstehen und demgemäß eine erhöhte Nachfrage nach Emissionszertifikaten besteht, steigt der Preis für diese rapide an (Abb. 3.2-8): bis zu 600 US-\$ pro Tonne Kohlenstoff im Szenario B1*-400 und 400 US-\$ pro Tonne Kohlenstoff im Szenario A1T*-450 (Nakicenovic und Riahi, 2003a). Dieser Effekt entfällt im Szenario B2-400, in welches die Nachhaltigkeitsleitplanken des WBGU nicht integriert wurden.

Auch die Handelsströme zwischen den Entwicklungsländern sind nicht unerheblich. Den Modellrechnungen nach werden China und der Mittlere Osten in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts die Hauptimporteure von Emissionsrechten aus Südasiens und Afrika südlich der Sahara sein (Nakicenovic und Riahi, 2003a).

In Abbildung 3.2-6 werden für die vier Makroregionen die historischen (1800–2000) und die 2000–2100 kumulierten Emissionen und Emissionsrechte für alle neun analysierten Szenarios (drei Referenzszenarios und sechs Stabilisierungsszenarios) gegenübergestellt. Der schwarze Trennbalken bei den Stabili-

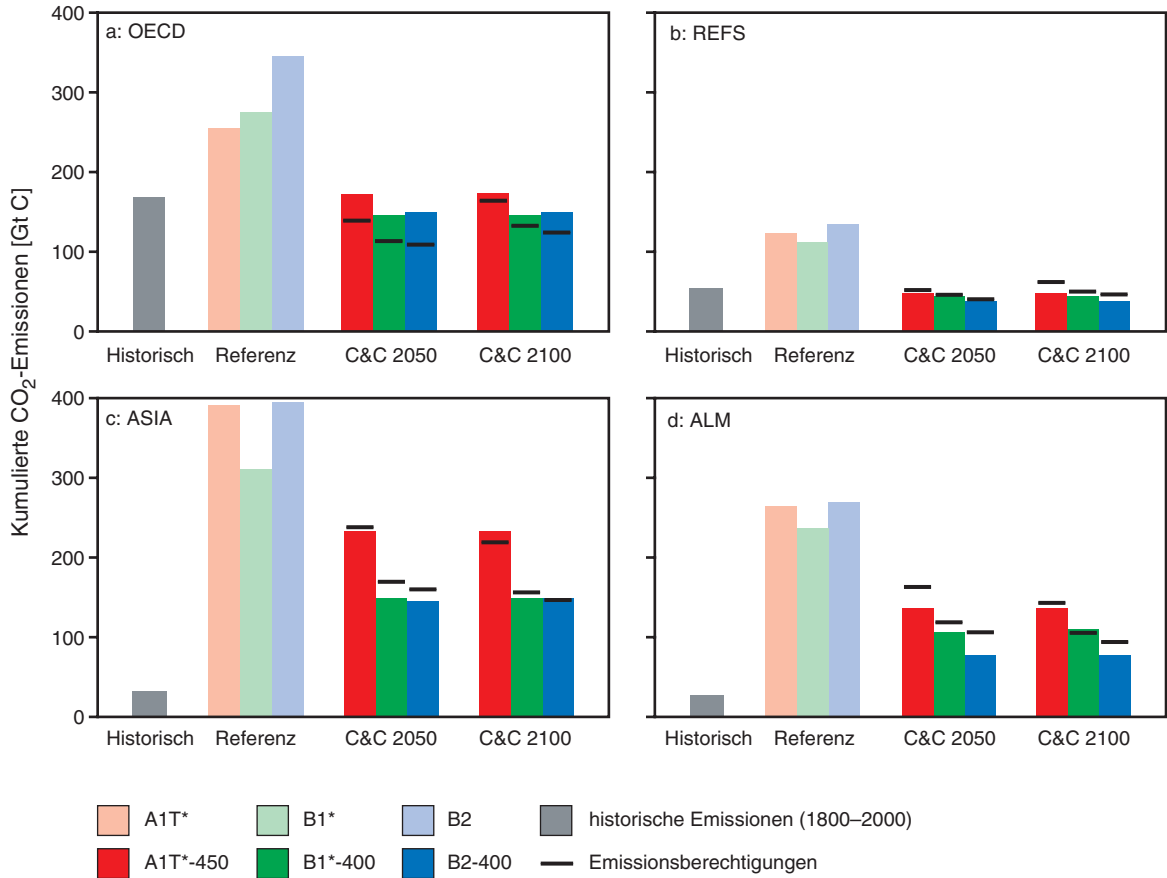


Abbildung 3.2-6

Kumulierte energiesystembedingte und industrielle CO₂-Emissionen. Historische (1800–2000) und zukünftige (2000–2100) Emissionen im Vergleich für die drei Referenzszenarios und die sechs Stabilisierungsszenarios, für die vier Makroregionen (a–d). Nomenklatur der Regionen wie in Abb. 3.2-1 und der Szenarios wie in Abb. 3.1-1. Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003a

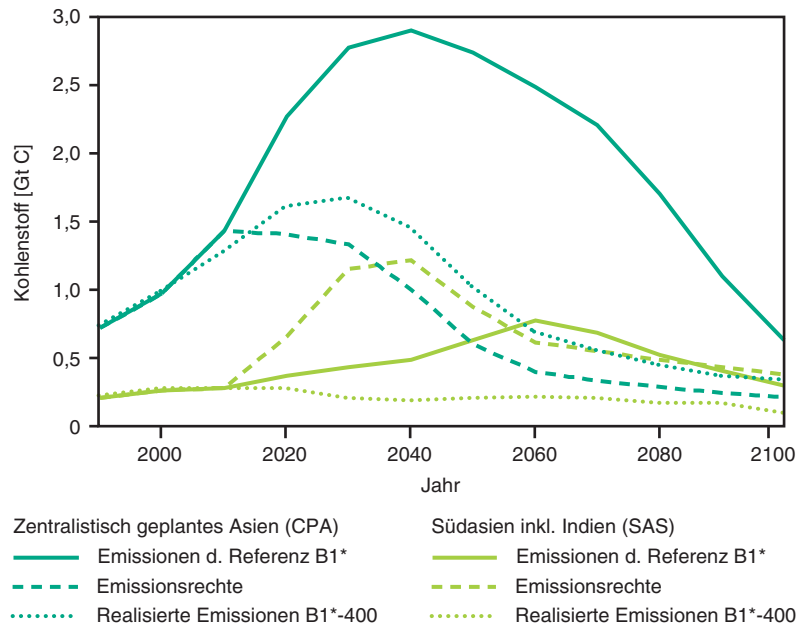
sierungsszenarios zeigt den Umfang der Emissionsrechte an. Darüber hinausgehende realisierte Emissionen spiegeln also den entsprechenden Zukauf von Emissionsrechten wider, darunter verbleibende realisierte Emissionen – bei Annahme von genügender Nachfrage – den Verkauf von Emissionsrechten. Die Differenz zwischen den Emissionen eines Referenzszenarios und den Emissionen der dazugehörigen Stabilisierungsszenarios zeigt die vorgenommenen Emissionsreduktionen auf. Die Abbildung veranschaulicht, dass der Anteil des Emissionshandels im Vergleich zur Emissionsreduktion relativ gering ausfällt. Die Befürchtungen, bei der Einführung eines globalen Emissionshandels würde nur ein geringer Teil der Emissionen reduziert und der größere Teil mit „heißer Luft“ eingekauft, erweisen sich zumindest für die analysierten Szenarios als unbegründet.

Anhand der sehr gegensätzlichen Regionen Süd-asien und dem planwirtschaftlich organisierten Asien

und China zeigt die Abb. 3.2-7 die mögliche Heterogenität der einzelnen Regionen innerhalb einer Makroregion. Süd-asien bleibt mit seinen realisierten Emissionen aus den oben genannten Gründen insbesondere bis zur Mitte des Jahrhunderts weit unter den zugeteilten Emissionsrechten. Das planwirtschaftlich organisierte Asien und China dagegen werden ab 2020 Emissionsrechte zukaufen müssen und sind ausgehend von ihrem Referenzpfad mit erheblichen Emissionsreduktionen konfrontiert. Grund hierfür ist die billige Kohle, welche im Referenzszenario vermehrt zur Energieerzeugung verwendet wird – vor allem in der ersten Hälfte des Jahrhunderts. Im Stabilisierungsszenario muss diese durch erneuerbare Energie ersetzt werden. Auf Grund des begrenzten Potenzials mancher Regionen für diese Transformation müssen das planwirtschaftlich organisierte Asien und China entsprechende Mengen an Emissionsrechten zukaufen, was zum

Abbildung 3.2-7

Vergleich der Emissionen im Referenzszenario B1*, der Emissionsrechte sowie der realisierten Emissionen im Stabilisierungsszenario B1*-400 beim Ansatz Verringerung und Konvergenz mit dem Zieljahr 2050 für die Regionen planwirtschaftlich organisiertes Asien und Südasien. Nomenklatur wie in Abb. 3.2-1 und der Szenarios wie in Abb. 3.1-1. Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003b



CO₂-Handel zwischen Entwicklungsländern derselben Region führt.

Betrachtet man die Entwicklung des Preises für Emissionszertifikate in den unterschiedlichen Stabilisierungsszenarios und unter Berücksichtigung der zwei ausgewählten Konvergenzjahre, so fällt auf, dass er vorrangig durch das zugrunde liegende Basisszenario bestimmt wird (Abb. 3.2-8). Eine Veränderung des Konvergenzjahres wirkt sich kaum auf den Preis aus. Bis 2040 entwickelt sich der Zertifikatspreis in allen Szenarios relativ ähnlich. Zwischen 2040 und 2060 findet, wie bereits ausgeführt, eine Differenzierung vor allem zwischen den keinen WBGU-Nachhaltigkeitsleitplanken unterliegenden und damit bis dahin günstigeren B2-400-Szenarios und den A1T*-450- und B1*-400-Szenarios statt. Denn durch den Ausstieg aus nichtnachhaltigen Technologien bis 2050 entstehen in den A1T*-450- und B1*-400-Szenarios Spitzen bei den Grenzkosten, die sich in entsprechend hohen Zertifikatspreisen niederschlagen. Nach 2060 entspannt sich dann umgekehrt der Preis für Emissionsrechte in den Szenarios A1T*-450 und B1*-400, die in ihren Storylines über eine größere Dynamik in der Entwicklung neuer Technologien verfügen, und steigt in dem Szenario B2-400 weiter an. Der Preisanstieg für B1*-400 nach 2090 ist wiederum auf den Ausstieg aus der Sequestrierung bis 2100 zurückzuführen, einer Leitplanke, die weder für das Szenario B2-400 noch für A1T*-450 gesetzt wurde. Ohne diese Vorgabe würde sich der Preis für Emissionszertifikate im Szenario B1*-400 – trotz des niedrigeren angestrebten CO₂-Konzentrationsniveaus – auf etwa der Höhe des Preises im Szenario A1T*-450 bewegen. Dies kann als Hinweis darauf

gewertet werden, dass sich die Stabilisierungskosten im nachhaltigen Szenario günstiger entwickeln (Kap. 3.1, Kap. 3.2.3).

3.2.3

Voraussichtliche wirtschaftliche Auswirkungen

Um die Auswirkungen der Verringerung der Emissionen und Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionsrechte auf das Bruttoinlandsprodukt der Regionen zu berechnen, wurden neben den Einnahmen und Ausgaben aus dem Emissionshandel die Energiesystemkosten herangezogen, die aus den Iterationen von MESSAGE und MACRO hergeleitet wurden (Kap. 3.1). Dabei wurden die durch Klimaschutz vermiedenen externen Kosten für Klimaschäden und Anpassungsmaßnahmen sowie der externe Nutzen des Klimaschutzes, z. B. in Form vermiedener Luftverschmutzung, nicht berücksichtigt.

Verbunden mit einer Verteilung der Emissionsrechte nach dem Modell der Verringerung und Konvergenz ist häufig die Erwartung hoher finanzieller Transfers aus den Industrie- in die Entwicklungsländer. Diese finden über den Emissionshandel zwar statt, der Effekt ist aber nur bei einem Konvergenzjahr von 2050 und im B2-Stabilisierungsszenario eindeutig festzustellen (Abb. 3.2-9).

Netto verbuchen die Transformationsländer in allen bis 2050 konvergierenden Szenarios Verluste. Russland kann z. B. in den ersten Dekaden des Jahrhunderts „heiße Luft“ verkaufen. Dies ist eine Periode mit relativ niedrigen Preisen für Emissionszertifikate. In Folge einer in den Modellen angenomme-

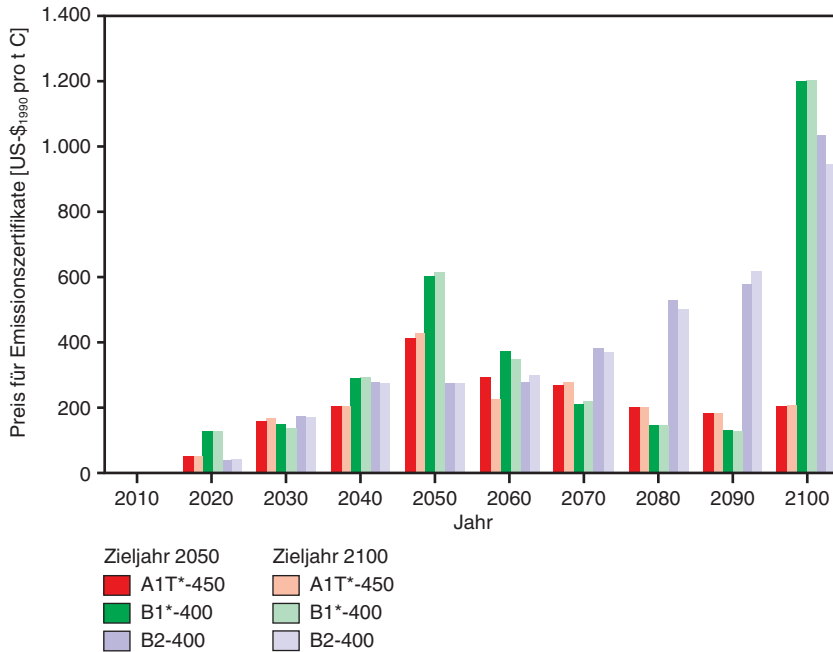


Abbildung 3.2-8
Die Entwicklung des Preises für Emissionszertifikate für die drei Stabilisierungsszenarios mit dem Ansatz Verringerung und Konvergenz mit den Zieljahren 2050 bzw. 2100. Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003b

nen, bis dahin fehlenden technologischen Anpassung hin zu emissionsarmen bzw. emissionsfreien Energieträgern – möglich durch die Nutzung der großen heimischen Gasvorräte – müssen hingegen Zertifikate in einer Zeit zugekauft werden, in welcher der Preis stark ansteigt.

Zusammen genommen fließen aus dem Emissionshandel bis 2100 aus den OECD- und Transformationsländern ungefähr 8.000–13.000 Mrd. US-\$ in die Entwicklungsländer. Jährlich sind dies, mit großen zeitlichen Schwankungen, 84–128 Mrd. US-\$ (Nakicenovic und Riahi, 2003a). Zum Vergleich: Die

öffentliche Entwicklungshilfe im Jahr 2000 lag global bei 53 Mrd. US-\$.

Die aus dem Emissionshandel stammenden finanziellen Transfers decken die Reduktionskosten allerdings nicht, mit denen die Entwicklungsländer konfrontiert sind. Auch kompensieren sie nicht die Verluste der rohstoffreichen Regionen (Kohle, Öl), die diese als Folge ausbleibender Exporte erleiden. Weil sie zudem auf ihre leicht verfügbaren Energieträger verzichten müssen, sind sie auf den vermehrten Zukauf von Energieträgern wie z. B. Flüssiggas oder Bioalkohol angewiesen.

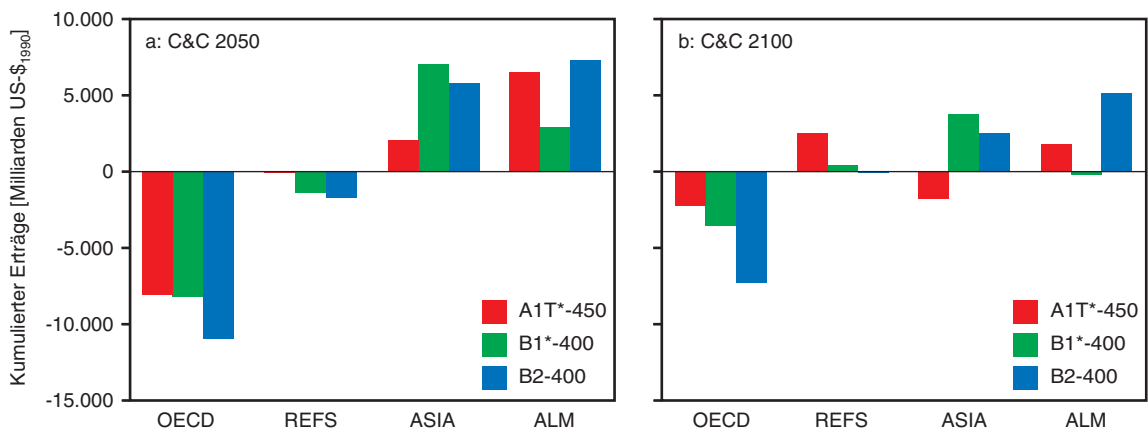


Abbildung 3.2-9
Kumulierte Erträge aus dem Emissionshandel für die vier Makroregionen und die drei Stabilisierungsszenarios. Nomenklatur der Regionen wie in Abb. 3.2-1 und der Szenarios wie in Abb. 3.1-1. Quelle: Nakicenovic und Riahi, 2003a

Die Auswirkungen auf das BIP sind vergleichend für die Jahre 2020, 2050 und 2100 für alle sechs Reduktionsszenarios in Abb. 3.2-10 dargestellt. Bestätigt werden die hohen Kosten in der Mitte des Jahrhunderts und die durch das jeweilige Referenzszenario bedingte Höhe der wirtschaftlichen Auswirkungen – z. B. die wirtschaftlichen Implikationen der 2050 stark ansteigenden Grenzkosten durch den schnellen Ausstieg aus nichtnachhaltigen Technologien in den A1T*-450- und B1*-400-Szenarios wie auch die aus der geringen technologischen Dynamik der Storyline resultierende hohe Belastung in den B2-Szenarios. Der Einfluss des Konvergenzjahres zeigt sich in den etwas weniger negativen Werten für Entwicklungsländer bei einer Konvergenz bis 2050 und für Industrie- und Transformationsländer bei einer Konvergenz bis 2100, wobei diese Unterschiede im Vergleich zu den oben genannten, durch das Referenzszenario bedingten Differenzen, gering ausfallen.

Auffällig sind die Gewinne von Südasien, die 2020 insbesondere im Szenario A1T*-450-C&C-2050 und B1*-400-C&C-2050 sehr hoch ausfallen (ca. +5% bzw. +4% im Vergleich zum Referenzszenario) und 2050 bei über 4% im Szenario B1*-400-C&C-2050 bzw. über 2% im Szenario B1*-400-C&C-2100 liegen. Erklären lässt sich dies mit der großen Menge an zu verkaufenden Emissionszertifikaten (Kap. 3.2.2).

Bis 2100 gehen in den Stabilisierungsszenarios A1T*-450 und B1*-400 die negativen wirtschaftlichen Auswirkungen für nahezu sämtliche Regionen auf sehr geringe Werte zurück. Verantwortlich dafür sind vor allem dynamische Lernprozesse, die den massiven Investitionen im Bereich der erneuerbaren Energien folgen. Eine Schlüsselrolle spielen hierbei die solare Stromproduktion und die solare Wasserstoffherzeugung (Kap. 3.1.2.2). Allein die rohstoffreichen Regionen der früheren Sowjetunion (Erdgas) sowie der Mittlere Osten und Nordafrika (Erdöl) verzeichnen in Folge ihrer ausbleibenden Erlöse aus Rohstoffexporten Verluste in Höhe von beinahe 3% bzw. knapp 2%.

3.3 Fazit

Aus dem Vergleich der beschriebenen Modellergebnisse (Nakicenovic und Riahi, 2003a und b) lässt sich folgendes Fazit ziehen: Die gegenüber einer Welt ohne Klimaschutz eingesparten CO₂-Emissionen lassen sich in drei Kategorien gruppieren: Nachfragesenkungen infolge höherer Preise, strukturelle Veränderungen (insbesondere verstärkter Einsatz erneuerbarer Energieformen und kohlenstoffarmer

konventioneller Technologien) sowie CO₂-Speicherung. Verbesserungen der Energieeffizienz fallen dabei in die ersten beiden Kategorien.

Die durch Klimaschutz bedingten höheren Energiepreise wirken sich in allen CO₂-stabilisierenden Szenarios nur relativ schwach nachfragesenkend aus. Der Beitrag der Kohlenstoffspeicherung bleibt auch am Ende des Jahrhunderts konstant groß, wenn er nicht exogen eingeschränkt wird (wie in B1*-400). Die strukturellen Veränderungen in allen untersuchten Welten sind einander sehr ähnlich. Ihre charakteristischen Merkmale werden in Abb. 3.1-3 deutlich: Mit Ausnahme des Referenzszenarios B2 entwickeln sich die Energiesysteme aller untersuchten Welten zum Ende des 21. Jahrhunderts weiter in Richtung kohlenstofffreier Systeme.

Der Strukturwechsel in Richtung kohlenstofffreier Systeme verläuft auf den folgenden Pfaden:

- Die Verringerung der Kohlenstoffintensität im fossilen Sektor erfolgt durch eine verstärkte Nutzung von Gas auf Kosten von Öl und Kohle. Insbesondere die Kohlenutzung läuft in allen CO₂-stabilisierenden Szenarios in der Mitte des Jahrhunderts praktisch aus (A1T*-450, B1*-400) oder verringert sich zumindest weitgehend (B2-400). Bei ehrgeizigen Klimaschutzzielen und auf längeren Zeitskalen sind demnach auch modernste Kohlekraftwerke keine zukunftsfähige Technologie.
- In allen untersuchten Klimaschutzszenarios kommt es im Endenergiesektor zur Entwicklung einer Strom-Wasserstoff-Wirtschaft, die besonders in A1T*-450 und B1*-400 weit fortgeschritten ist. Der Einstieg in die Strom-Wasserstoff-Wirtschaft stützt sich zunächst immer auf Wasserstoff aus fossilen Quellen, wobei die Technologien zu seiner Herstellung bereits heute großtechnisch verfügbar sind. Nur dadurch gelingt es, den Endenergie-Sektor rechtzeitig umzubauen. Langfristig entwickelt sich die Strom- und Wasserstoffbereitstellung in A1T*-450 und B1*-400 weitgehend hin zu solaren Technologien, während in B2-400 die H₂-Bereitstellung auf Basis kohlenstoffhaltiger Ausgangsstoffe wichtig bleibt.
- Insbesondere in A1T*-450 und B1*-400 beruht die Energieversorgung zum Ende des Jahrhunderts wesentlich auf solarer Elektrizität und solar erzeugtem Wasserstoff. Dieser deutliche Schwerpunkt in der Versorgungsstruktur bedeutet eine große Abhängigkeit von technologischen Verfahren, die heute noch am Anfang ihrer Entwicklung stehen. Zur Absicherung dieses Entwicklungspfad sollten daher die globalen Forschungsanstrengungen in diesem Bereich beträchtlich ausgebaut werden.

Werden die globalen Emissionsbudgets auf die einzelnen Länder bzw. Regionen nach dem Ansatz der Verringerung und Konvergenz aufgeteilt, verändern sich in Abhängigkeit vom gewähltem Konvergenzjahr (hier beispielhaft 2050 und 2100) die Ausstattung mit Emissionsrechten und die wirtschaftlichen Implikationen regional signifikant.

2100 konvergierende Pro-Kopf-Emissionsrechte entlasten die Industrie- und Transformationsländer in ihren Reduktionsverpflichtungen. Dagegen sind mit einer derart verzögerten Konvergenz für die Entwicklungsländer entsprechend weniger Emissionsrechte und eine wirtschaftlich höhere Belastung als bei bis 2050 konvergierenden Pro-Kopf-Emissionsrechten verbunden.

Zur Vermeidung einer gefährlichen Klimaänderung empfiehlt der Beirat, sich in den Verhandlungen zur zweiten Verpflichtungsperiode des Kioto-Protokolls für eine Verteilung der Emissionsrechte nach dem Modell der Verringerung und Konvergenz mit bis 2050 konvergierenden Pro-Kopf-Emissionsrechten einzusetzen. Neben der Zielgenauigkeit in Bezug auf die CO₂-Emissionen ist mit diesem Ansatz der Versuch verbunden, das grundsätzlich gleiche Recht aller Individuen auf Emissionen weitgehend umzusetzen.

Die Förderung der globalen technologischen und wirtschaftlichen Konvergenz sowie einer nachhaltigen Entwicklung und die Sicherstellung eines funktionsfähigen Emissionshandels erweisen sich als zentrale Ansatzpunkte, um dieses Ziel möglichst kostengünstig zu erreichen.

4.1 Die globale Kohlenstoffbilanz

Die Oberfläche der Erde (Land- und Wasserflächen) nahm zwischen 1990 und 2000 2–4 Gt Kohlenstoff pro Jahr auf (Schimel et al., 2001). Diese Senke reagiert empfindlich auf klimatische Ereignisse und menschliche Einflüsse. Die Bandbreite reicht von Jahren, in denen die Emissionen aus der Verbrennung fossilen Kohlenstoffs fast vollständig absorbiert werden (Abb. 4.1-1a) bis hin zu Jahren, in denen die Kapazität dieser Senke fast Null ist (Prentice et al., 2001). Ein Großteil dieser Schwankungen wird auf das El-Niño-Phänomen und sehr große Brände zurückgeführt. Gegenwärtig ist die Kapazität der Senke zwar groß, aber abnehmend (Rödenbeck et al., 2003).

Trotz aller Schwankungen ist die globale Oberflächensenke im Mittel proportional zu den Emissionen aus fossilen Brennstoffen gestiegen. Der in der Atmosphäre verbleibende Kohlenstoffanteil liegt über die letzten 40 Jahre überraschend konstant bei ca. 40%, abgesehen von kurzzeitigen Veränderungen durch El Niño und Brände (Abb. 4.1-1b). Das bedeutet,

– dass die Netto-Oberflächensenke mit den Emissionen aus fossilen Brennstoffen und der atmosphärischen CO₂-Konzentration angewachsen ist, und

- dass die Oberflächensenke noch nicht mit CO₂ gesättigt ist. Es ist ungewiss, ob und wann das passiert.

Die Aufteilung des CO₂-Flusses in terrestrische und marine Aufnahme ist lange Zeit diskutiert worden. Schimel et al. (2001) kommen zu dem Schluss, dass der Fluss in den Ozean zwischen 1990 und 2000 relativ konstant war (1,7–1,9 Gt C pro Jahr), während die Nettoaufnahme in terrestrischen Systemen viel größeren Schwankungen unterlag.

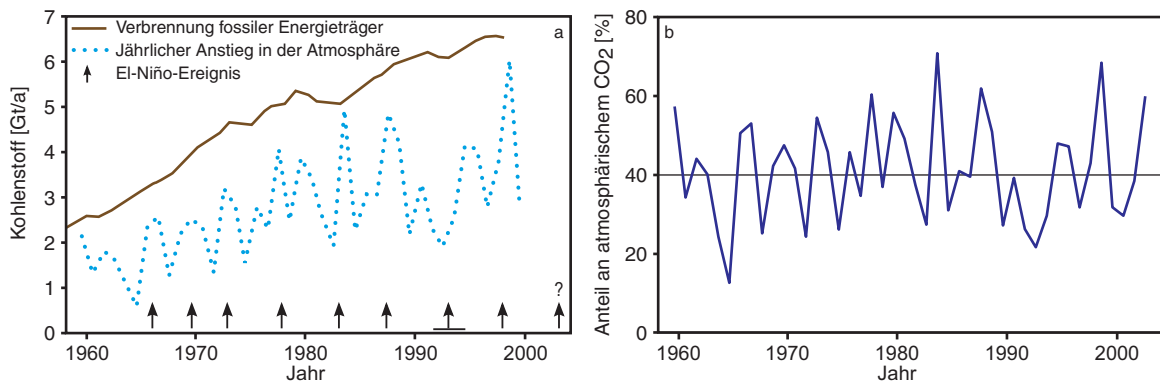


Abbildung 4.1-1

a: Emissionen aus fossilen Brennstoffen und der Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Die Pfeile auf der Zeitachse weisen auf El-Niño-Jahre hin. Eine hohe CO₂-Anstiegsrate bedeutet eine niedrige Aufnahme an der Erdoberfläche. Die Differenz zwischen der Kurve der Emissionen fossiler Brennstoffe und dem Anstieg in der Atmosphäre ist die globale Oberflächensenke.

b: Anteil der Emissionen aus fossilen Brennstoffen, die zwischen 1960 und 2002 zum Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre beigetragen haben.

Quelle: a) nach Prentice et al., 2001 b) Heimann, persönliche Mitteilung

| | [Gt C / a] | [%] |
|--|------------|-----|
| Emissionen fossiler Brennstoffe | 6,3 ± 0,4 | |
| USA | 1,6 | 25 |
| EU-15 | 1,1 | 17 |
| Russland | 0,8 | 13 |
| Deutschland | 0,3 | 4,8 |
| Anstieg der atmosphärischen CO ₂ -Konzentration | 3,2 ± 0,1 | |
| Netto-Aufnahme durch die Ozeane | 1,7 ± 0,5 | |
| Netto-Aufnahme durch die Kontinente | 1,4 ± 0,7 | |
| Emissionen durch Landnutzungsänderung | 1,6 ± 0,8 | |
| Aufnahme durch Vegetation | 3,0 | |
| USA | 0,8 | 27 |
| Europa | 0,4 | 13 |
| Sibirien | 1,3 | 43 |
| Tropen | 0,5 | 17 |

Tabelle 4.1-1
Die globale Kohlenstoffbilanz für den Zeitraum 1990–2000.
Quelle: nach Schimel et al., 2001

Die weltweite Kohlenstoffbilanz (Tab. 4.1-1) zeigt die regionalen Unterschiede sowohl der fossilen Emissionen als auch der Aufnahme von CO₂ in der Biosphäre. Die Emissionen, die zu einem großen Teil aus den USA und Europa stammen, führen zu einem jährlichen Anstieg des atmosphärischen CO₂ um 3,2 ± 0,1 Gt. Die Aufnahme in die Ozeane betrug 1,7 ± 0,5 Gt pro Jahr, die Landflächen nahmen 1,4 Gt ± 0,7 Gt pro Jahr auf. Der Beitrag der Kontinente resultiert aus der gegenwärtigen Aufnahme in terrestrische Systeme von 3,0 Gt C pro Jahr und der Freisetzung von Kohlenstoff durch Landnutzungsänderungen in Höhe von 1,6 Gt C pro Jahr. Es ist wichtig zu erkennen, dass die Aufnahme von CO₂ auf den Landflächen nicht gleichmäßig verteilt ist, sondern hohe regionale Unterschiede aufweist. Die sibirische Vegetation, die zum überwiegenden Teil aus natürlichen, unbewirtschafteten Wäldern besteht, trägt mit 43% am stärksten zur terrestrischen Aufnahme bei.

Aus Tab. 4.1-1 können verschiedene Schlüsse gezogen werden:

- Die Landfläche der USA nimmt etwa die Hälfte der US-amerikanischen Emissionen wieder auf.
- Die Landfläche Europas reassimiliert gut ein Drittel der europäischen Emissionen.
- Die Flächen Europas und Russlands, vornehmlich die unberührten borealen Wälder, sind für die Aufnahme von 89% der Emissionen dieser Gebiete verantwortlich. Dies unterstreicht die globale Bedeutung unbewirtschafteter Primärwälder.
- Da die Verteilung der Kohlenstoffemissionen zwischen Atmosphäre und globaler Oberfläche konstant ist, kann man schließen, dass die borealen Wälder und Böden nicht mit Kohlenstoff gesättigt sind.
- Die Emissionen aus Landnutzungsänderung stammen zumeist aus der Nutzung von Primärwäldern und tragen 25 ± 12% zu den globalen

Emissionen bei. Die Auswirkung der Landnutzungsänderungen ist somit fünfmal größer als im Kioto-Protokoll als Ziel definiert und wird auch in Zukunft eine Quelle für Kohlenstoff bleiben.

Das heutige Wissen über den Kohlenstoffkreislauf unterstreicht die Notwendigkeit, die Landnutzung und die terrestrische Kohlenstoffbilanz in die Überlegungen zum Management des globalen Kohlenstoffbudgets einzubeziehen.

Abb. 4.1-2 zeigt die verschiedenen Stoffflüsse, die an der terrestrischen Kohlenstoffbilanz beteiligt sind. Die Nettobiomproduktion (NBP) wäre die geeignete Größe, um die Senkenqualität einer Region oder eines Landes zu betrachten. Die Atmosphäre „sieht“ keine Nettoprimärproduktion (NPP) und keine Nettoökosystemproduktion (NEP), sondern nur NBP.

Ciais et al. (2003) haben NPP und NBP für die Amazonasregion, den sibirischen und den europäischen Wald verglichen (Abb. 4.1-3). Die NPP ist etwa zehnmal größer als NBP. Während die Nettoprimärproduktion der Amazonasregion zweimal so groß ist wie diejenige Europas und auch die NPP Sibiriens um das dreifache übersteigt, ist die Rate der NBP sogar niedriger als in Europa und Sibirien.

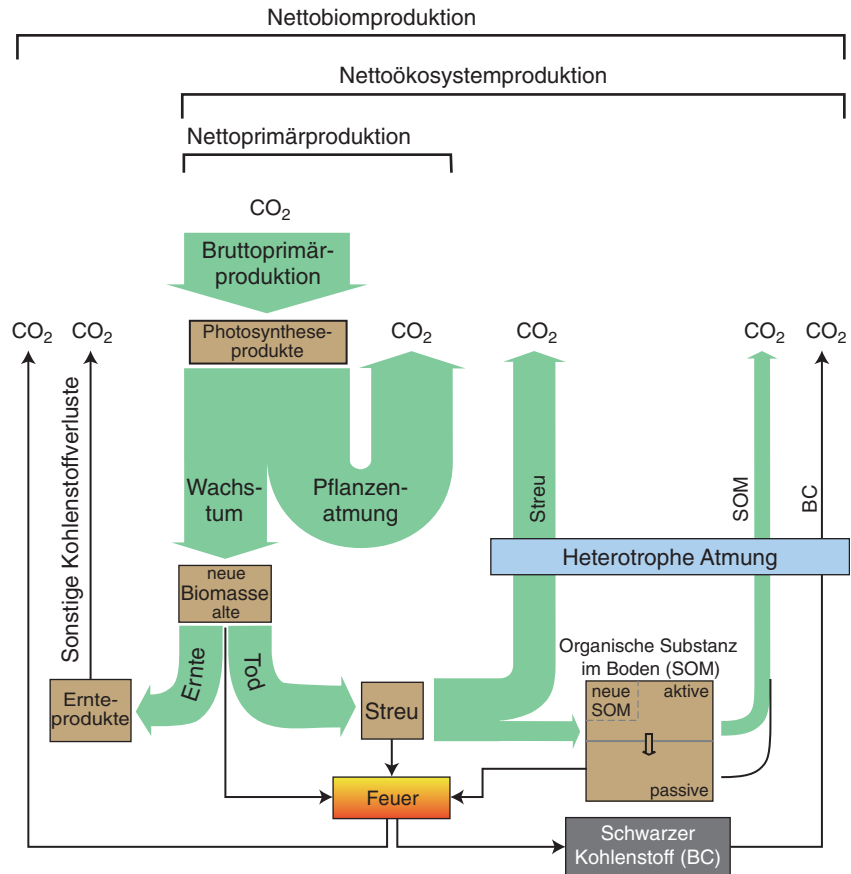
Während NPP und NBP in der Amazonasregion allein mit dem beobachteten Anstieg von CO₂ erklärt werden können, ist dies in Sibirien nicht der Fall. Wahrscheinlich hängen sie hier auch mit dem Temperaturanstieg zusammen. In Europa ist die Situation komplexer. Im Gegensatz zu Modellen und Bestandsaufnahmen zeigen Fallstudien einen starken CO₂-Effekt. Der Effekt wird vermutlich durch Stickstoffeinträge aus der Atmosphäre verursacht. Daher gilt:

- Die globale Kohlenstoffsenke ist weit größer als die „Kioto-Senke“, weil das Kioto-Protokoll sich nur auf kleine Teile der Landoberfläche bezieht.
- Die Regionen verhalten sich unterschiedlich.

Abbildung 4.1-2

Die Kohlenstoffflüsse im Ökosystem sowie Definitionen, die zur Beschreibung der Flüsse der Komponenten verwendet werden.

Quelle: nach Schulze et al., 2000



Hohe CO₂-Konzentrationen können die NPP in den Tropen, aber nicht in Sibirien erklären. In Europa wird die Senke durch direkte und indirekte menschliche Einwirkungen beeinflusst.

4.2**Das terrestrische Gleichgewicht der Kohlenstoffflüsse**

Der globale Kohlenstoffkreislauf ist durch große Flüsse in Richtung Erdoberfläche und von ihr weg gekennzeichnet, welche die gewaltigen terrestrischen und ozeanischen Kohlenstoffvorräte mit der relativ kleinen Kohlenstoffmenge in der Atmosphäre verbinden (Abb. 4.2-1). Die Nettoflüsse sind die Differenz dieser großen Flüsse. Das System ist daher hochempfindlich, weil kleine Veränderungen in der Richtung der Flüsse große Veränderungen des Nettoflusses auslösen.

Im Zusammenhang mit dem Kioto-Protokoll ist auf die großen Kohlenstoffvorräte in der Biosphäre hinzuweisen. Dabei ist in der pflanzlichen Biomasse mit 560 Gt C fast soviel gespeichert, wie in der Atmosphäre mit 750 Gt C enthalten ist. Die terre-

strische pflanzliche Biomasse besteht überwiegend aus Holz, und die größte Menge davon ist in den nicht bewirtschafteten Primärwäldern gespeichert (IGBP, 1998). Die Emissionen aus Landnutzungsänderungen (Tab. 4.1-1) entstehen hauptsächlich durch die Zerstörung dieser Ressource. Böden enthalten etwa doppelt soviel Kohlenstoff wie die Atmosphäre und Nutzungsänderungen können bis zu 50% des Bodenkohlenstoffs freisetzen, z. B. durch das Pflügen natürlichen Graslands. Änderungen der Kohlenstoffvorräte wurden in der Vergangenheit vor allem durch Landnutzungsänderungen hervorgerufen, deren Einfluss größer war als die Klimawirkungen. Dieses ist nicht nur ein Problem der Entwicklungs-, sondern auch der Industrieländer. Infrastrukturmaßnahmen (z. B. Bodenversiegelung durch Straßenbau) „verbrauchten“ in den Industrieländern große Mengen Bodenkohlenstoffs, die nicht durch die Aufforstung einer vergleichbar großen Fläche ausgeglichen wurden.

Abbau und Wiederaufbau der ökosystemaren Kohlenstoffvorräte verlaufen hochgradig asymmetrisch. Während der Abbau sich fast augenblicklich vollzieht (z. B. durch Brandrodung in den Tropen), benötigt die Wiederherstellung des Kohlenstoffvor-

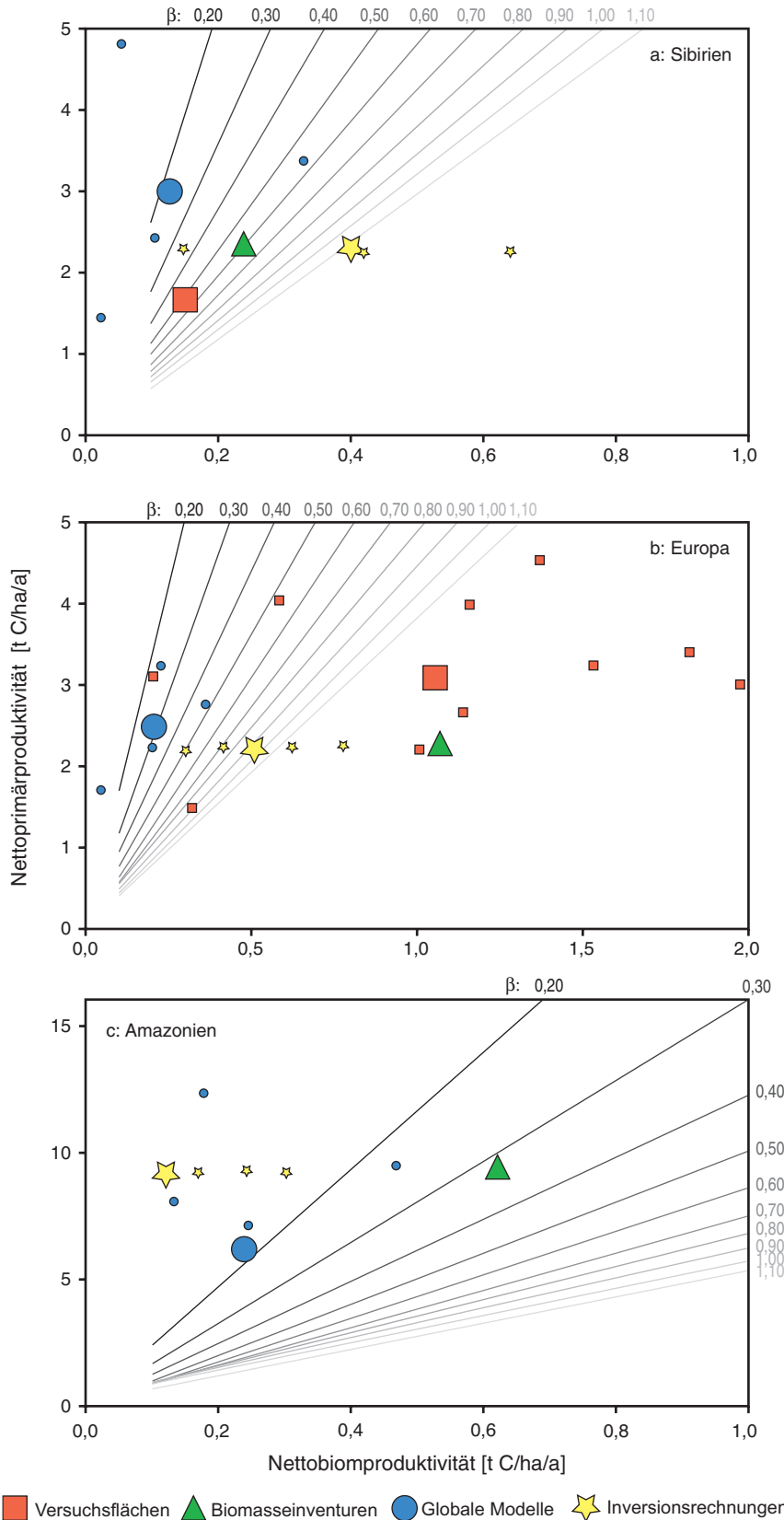
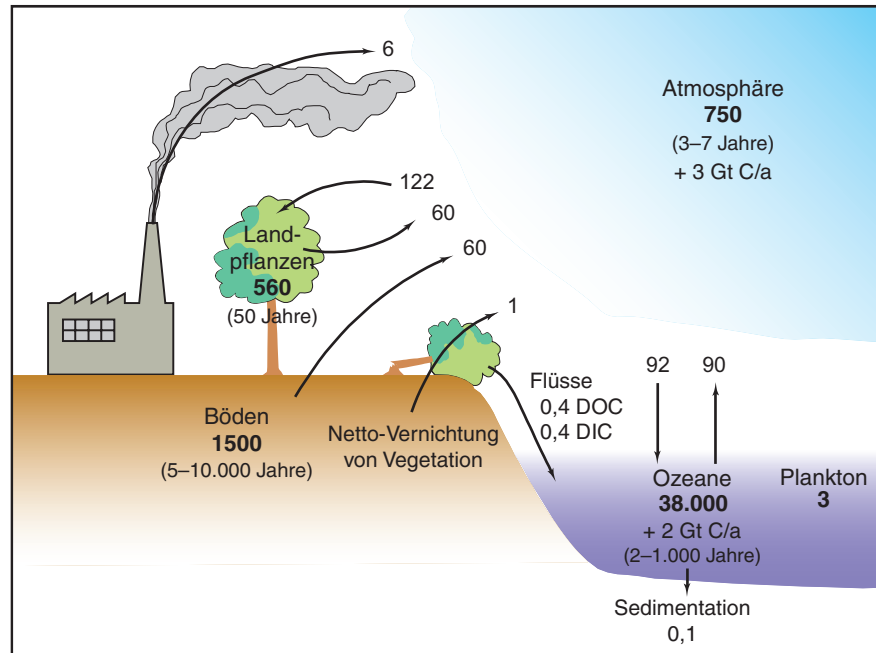


Abbildung 4.1-3
 Vergleich von Nettoprimärproduktivität (NPP) und Nettobiomproduktivität (NBP) in Sibrien, Europa und Amazonien anhand von Beobachtungen auf kleinen Versuchsflächen, großräumigen Biomasseinventuren, globalen Modellen und Inversionsrechnungen auf der Basis von CO_2 -Konzentrationsmessungen in der Troposphäre. Die schräg verlaufenden Linien zeigen die Veränderung von NPP und NBP bei einer Verdopplung der CO_2 -Konzentration (350 auf 700 ppm), den sog. β -Faktor. Im Experiment wird bei Verdopplung der CO_2 -Konzentration eine Steigerung der NPP um 20–40% beobachtet. Die Lage der Beobachtungspunkte unter oder über dem Bereich der 0,2-Linie zeigt an, ob NPP durch die Veränderung der CO_2 -Konzentration erklärbar ist. Quelle: Ciais et al., 2003

Abbildung 4.2-1

Der globale Kohlenstoffkreislauf. Schema der Kohlenstoffvorräte und -flüsse im globalen Maßstab. Werte für die Vorräte in Gt C (fett gedruckte Zahlen). Mittlere Flüsse in Gt C pro Jahr (normal gedruckte Zahlen). Zeitangaben in Klammern. Der Fluss in die Böden beträgt etwa 1,5 Gt pro Jahr. DOC = gelöster organischer Kohlenstoff, DIC = gelöster anorganischer Kohlenstoff. Quelle: nach Schlesinger, 1997



rats Jahrhunderte. Daher können beispielsweise in Deutschland die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf die Kohlenstoffvorräte im Boden noch nach Jahrhunderten nachgewiesen werden (Wirth et al., 2003; Abb. 4.2-2).

Die natürliche Kohlenstoffanreicherung im Boden verläuft sehr langsam. Sie liegt zwischen 0,5 t C pro ha und Jahr während einer 100jährigen Erholungsphase nach landwirtschaftlicher Nutzung (Jenkinson et al., 1992) und 0,05 t C pro ha und Jahr in einer Walderholung während einer Umtriebszeit in einem bewirtschafteten Wald (Mund und Schulze, 2003). Flächen unter dauernder Beobachtung in England – das berühmte „Rothamsted Experiment“ – zeigen auch mehr als 100 Jahre nach einer Umwandlung von Acker in Grünland keine Sättigung der Kohlenstoffakkumulation und Störungen, die experimentell vor 100 Jahren gesetzt wurden, sind noch heute in den Vorräten des Bodenkohlenstoffs nachweisbar.

Die Wirkungen von Bränden sind noch komplizierter. Bodenbrände führen zu einer Wachstumshemmung des verbliebenen Bestands, dem ein vermehrtes Wachstum aufgrund der verbesserten Kationenzufuhr folgt. Der Vorrat an Bodenkohlenstoff kann anfangs durch die Produktion von Holzkohle steigen, die allerdings durch ein nachfolgendes Feuer wieder aufgezehrt werden kann. Die Gesamtmenge an Holzkohle scheint daher konstant zu sein, es sei denn, dass sie durch Erosionsvorgänge vom Luftsauerstoff abgeschlossen wird (Czimeczik et al., 2003).

4.3

Regionale Abschätzungen der Kohlenstoffbilanz

Kohlenstoffbilanzen existieren heute erst für wenige Regionen. Hier wird die europäische Kohlenstoffbilanz beispielhaft vorgestellt. Janssens et al. (2003a) stellen fest, dass die europäische Biosphäre 7–12% der europäischen anthropogenen CO₂-Emissionen aufnimmt. Diese Schätzung ist beträchtlich niedriger als die 36% (Tab. 4.1-1), die von Schimel et al. (2001) berechnet wurden. Vor allem die Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden wurden in der Vergangenheit unterschätzt. Daher müssen die Zahlen aus dem IPCC-Bericht (2001a) revidiert werden.

Ein Anteil von 7–12% mag auf den ersten Blick gering erscheinen, aber das sind drei- bis viermal mehr als die Emissionen aus fossilen Energieträgern, die heute durch Wasserkraft vermieden werden. Die europäische Biosphäre arbeitet also sehr effizient. Diese Senke ist im Kioto-Protokoll aber nur zum Teil anrechenbar.

Auf der Grundlage heutiger, landbasierter Messungen wird der Wald in Europa mit rund 380 Mt C pro Jahr (Fluss aus der Atmosphäre in den Boden) als eine Senke angesehen, während die Landwirtschaft mit 200 Mt C pro Jahr als Quelle eingeschätzt wird (Fluss aus dem Boden in die Atmosphäre). Die Zahl für die Landwirtschaft bezieht sich auf die Vorratsänderung in den Böden und enthält weder die Emissionen aus Tierhaltung und aus Mist noch die Emissionen anderer Treibhausgase (CH₄ und N₂O) aus Tierhaltung, Weide- und Ackerland. Die gesamt-

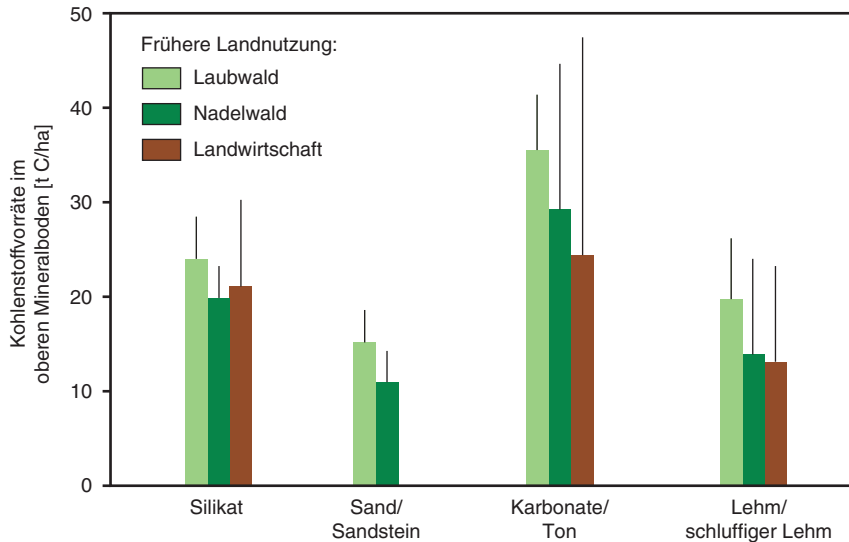


Abbildung 4.2-2
Kohlenstoffvorräte im oberen Mineralboden (0–10 cm) unter derzeitigen Waldbeständen bei unterschiedlicher Vornutzung in der Vergangenheit mit Standardabweichung. Quelle: nach Wirth et al., 2003

ten landwirtschaftlichen Emissionen an Treibhausgasen sind daher sogar höher anzusetzen.

Europa besteht aus einem Mosaik unterschiedlicher Landnutzung. Daher sind eine genaue Bewertung der Landnutzungsdaten ebenso wie Informationen über landwirtschaftliche und forstliche Managementstrategien unerlässlich, um eine verlässliche Nettokohlenstoffbilanz dieser Region zu erstellen. Die Vereinbarungen zur Anrechnung von Quellen und Senken in Forst- und Landwirtschaft gemäß des auf der 6. Vertragsstaatenkonferenz der UNFCCC vereinbarten sog. Bonn-Abkommens helfen allerdings für die Nettokohlenstoffbilanz nicht weiter. In der Forstwirtschaft ist die Veränderung der Holzbiomasse in der Verpflichtungsperiode anrechenbar, wenn diese durch menschliche Aktivitäten seit 1990 ausgelöst wurde (Brutto-/Nettoansatz). Nur 15% der Bruttoveränderungen sind so anrechenbar, um indirekte Effekte des Globalen Wandels auszuschließen (vermehrte CO₂- und N-Deposition). Im Gegensatz dazu wird in der Landwirtschaft eine Nettoveränderung aus dem Jahr 1990, die eine Emission sein könnte, mit einer Nettoveränderung in der Verpflichtungsperiode verglichen, die ebenfalls eine Emission sein kann. Hat sich die Emissionsrate im Vergleich zu 1990 verringert, kann die Differenz angerechnet werden (Netto-/Nettoansatz). Obwohl landgestützte Messungen einschließlich Landnutzungsdaten zur Zeit der UNFCCC-Datenbank über die Nationalberichte übermittelt werden und Kohlenstoffquellen in den Berichten im Prinzip genannt werden müssen, sind bisher nur wenige Länder dieser Verpflichtung nachgekommen. Demnach könnte der Netto-/Nettoansatz nach Artikel 3.4 UNFCCC für die Landwirtschaft einen falschen Eindruck erwecken, weil die Verringerung einer Quelle als Senke angerechnet

wird, obwohl das System natürlich eine Quelle bleibt. Für die Landwirtschaft sind keine verbindlichen Emissionsreduktionen vorgegeben. Ebenso gibt es keine Anreize zur Vermeidung von Kohlenstoffemissionen in der Forstwirtschaft. Die vermehrte Nutzung junger Bäume mit kurzen Umtriebszeiten führt zu beträchtlichen Emissionen, könnte in der Verpflichtungsperiode aber als vergrößerte Senke erscheinen.

Im Vergleich der einzelnen europäischen Länder zeigt sich, dass große Unterschiede im Abgleich der forstlichen Senke und der landwirtschaftlichen Quelle bestehen. „Gewinner“ sind Länder wie Österreich, Slowenien und die Slowakei mit ihren ausgedehnten Wäldern (Abb. 4.3-1). Dagegen sind kleine Länder mit hoher Bevölkerungsdichte, geringem Forstbestand aber viel Ackerland oder Länder mit verstärkter Nutzung von Feuchtgebieten Nettokohlenstoff-Emittenten. Der Handel mit Nahrungsmitteln und Holzprodukten verstärkt in vielen Ländern die Kohlenstoffemissionen.

4.4 Verifikation

Die Sorge, dass Senken in Wäldern nicht überprüfbar sind, hat zu einigen der Entscheidungen im Bonn-Abkommen geführt (Schulze et al., 2002). Mittlerweile wurden Verifikationsmechanismen entwickelt, die allerdings noch skalenabhängig sind. Für kleinräumige Bewertungen sind überzeugende statistische Ansätze entwickelt worden, um sogar minimale Veränderungen der Biomasse zu überprüfen. Die Verifikation der Veränderungen des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs bleibt aber schwierig.

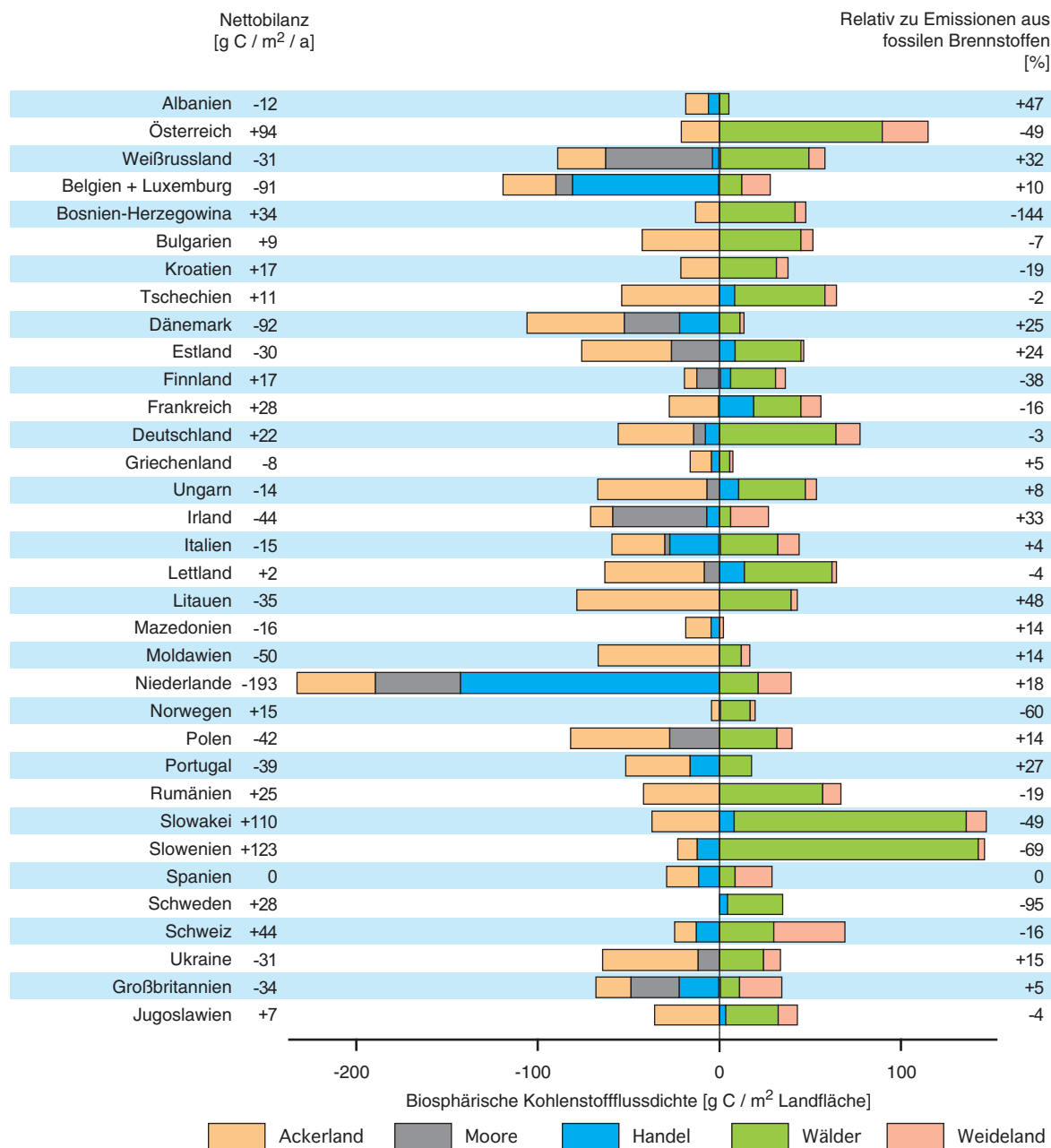


Abbildung 4.3-1
 Kohlenstoffbilanz der terrestrischen Biosphäre bezogen auf die Landfläche für verschiedene europäische Länder. Die Gesamtnettobilanz wird sowohl in absoluten Zahlen als auch im Vergleich zu den Emissionen aus fossilen Brennstoffen angegeben. Die Nettobilanz ergibt sich aus den Kohlenstoffquellen in der Landwirtschaft und den Senken bei Wäldern und Weideland. Der Handel schließt Nahrungsmittel und Holzprodukte entsprechend den nationalen Statistiken ein. Positive Werte stellen eine Senke dar.
 Quelle: Janssens et al., 2003b

Dies hat Konsequenzen, da Kompartimente, die keine Quelle zu sein scheinen, gemäß der UNFCCC nicht berichtet werden müssen. Wird ein unangemessener statistischer Ansatz verwendet, können Veränderungen verschwiegen werden, selbst wenn der Boden zu einer Quelle geworden ist. Allerdings wer-

den derzeit auch für Böden Ansätze zur Verifikation entwickelt. Für die regionale Ebene können die gleichen Ansätze wie für kleinräumige Bewertungen verwendet werden.

Für Bewertungen auf regionaler, nationaler und kontinentaler Ebene hat die EU in Europa mit der

Messung durch hohe Türme begonnen. Außerdem wird auf regelmäßigen Flügen über dem Kontinent troposphärische Luft gesammelt. Angesichts der großen „Fußabdrücke“ dieser Türme (500 km Durchmesser) und der hohen Zuverlässigkeit der Messungen von Spurengasen, könnten sie das Rückgrat eines zukünftigen Monitoring-Netzwerkes bilden, das eine unabhängige Überprüfung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre ermöglichen würde. Mit den hohen Türmen werden primär Konzentrationen und nicht Flüsse gemessen. Die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre, die es zu schützen gilt, ergibt sich aus der Summe der Flüsse aus fossilen Brennstoffen, Land- und Forstwirtschaft. Damit ist die Konzentration die ultimative Messgröße, die anzeigt, ob die Maßnahmen des Kioto-Protokolls eine Wirkung zeigen. Darüber hinaus kann anhand verschiedener Merkmale (Isotope, korrelierende Spurengase) auf die Veränderung der Quellen geschlossen werden.

Im 6. Rahmenprogramm hat die EU Forschungsprojekte ins Leben gerufen, die Kohlenstoffveränderungen mit 10%iger Genauigkeit auf kleinräumiger und regionaler Ebene (50x50 km) messen sollen, indem Atmosphären- und Bodenmessungen kombiniert werden.

4.5 Bewertung des gegenwärtigen Kioto-Protokolls im Hinblick auf Kohlenstoffsinken

4.5.1 Historische Probleme des Kioto-Protokolls

Die Vereinbarungen in Bonn und Marrakesch bei der 6. und 7. Vertragsstaatenkonferenz wurden von Schulze et al. (2002) kritisch bewertet. Ein kritischer Punkt hat seine Wurzeln in der Entstehungsgeschichte des Kioto-Protokolls. Während einige Länder dafür stimmten, Senken aus Land- oder Forstwirtschaft sowie Aufforstung und Wiederbewaldung einzubeziehen, strebten andere danach, diese Möglichkeiten auf eine sehr begrenzte Menge der gesamten Emissionsminderungen zu beschränken, um nicht die Reduktionsverpflichtungen für Emissionen aus fossilen Brennstoffen zu verwässern. Es wurde daher entschieden, dass „die bloße Existenz von Kohlenstoffvorräten nicht anrechenbar sei“. Ursprünglich war der Satz aus der Präambel des Bonn-Abkommens dazu gedacht, Maßnahmen, die keine direkten Emissionsminderungen sind, einzuschränken. Er führt jedoch zu großen Problemen bei der Minderung der Emissionen in die Atmosphäre. Die Kohlenstoffvorräte im Kohlenstoffkreislauf, die

hauptsächlich in unberührten Wäldern, aber auch in nachhaltig bewirtschafteten Wäldern aus gemäßigten Zonen vorkommen (wo sie sich aufgrund ökonomischer Auswirkungen verändern könnten), werden nicht berücksichtigt. Daher sind keine Anreize vorhanden, um den Verlust dieser Vorkommen zu verhindern, z. B. wenn Wälder oder Moore in Äcker oder Plantagen umgewandelt werden. Die Schwierigkeiten der Anrechnung in Annex-I- und Nicht-Annex-I-Staaten werden derzeit vom IPCC im „Good Practice Guidance“-Bericht bewertet. Die folgenden Beispiele vermitteln einen Einblick in die Entwicklungen und Risiken des Kioto-Abkommens in seiner jetzigen Form:

- Die Einbeziehung von Aufforstung und Wiederbewaldung birgt die Gefahr, dass Urwälder oder Moore zu Gunsten von Waldplantagen verloren gehen, die weitaus geringere Mengen von Kohlenstoff absorbieren und enthalten als die natürlichen Ökosysteme. Aufforstung von Torfland führt im Allgemeinen zu verminderten Kohlenstoffvorräten im Boden (Cannell et al., 1993), während weniger langfristige Kohlenstoffvorräte in der Biomasse und in der Streuschicht vergrößert werden. Zudem könnte die Biodiversität des betroffenen Ökosystems ernsthaft gefährdet werden.
- Die Wiederaufforstung von Weideland und Kulturlflächen kann sowohl zu einem Anstieg als auch zu einer Verringerung der Kohlenstoffvorräte im Boden führen. Der Effekt hängt von klimatischen Einflüssen, einer der Entwaldung vorausgehenden Landnutzung sowie den ursprünglichen Kohlenstoffvorräten im Boden ab (Vesterdal et al., 2002; Paul et al., 2002). Beispielsweise berichten Jackson et al. (2002) von Veränderungen bei den Kohlenstoffvorräten im Boden, die in den ersten 30–100 Jahren nach der Wiederaufforstung von Weideland zwischen -61 t C pro ha bis +13 t C pro ha variieren. In den meisten Gebieten überwogen die Verluste, nur in trockenen Regionen wurden Gewinne verzeichnet.
- Die Nettobilanz von Entwaldung und Wiederaufforstung ist in vielen Regionen negativ, weil die Verluste während der Waldzerstörung meist größer waren als die Gewinne in kürzlich wieder aufgeforsteten Gebieten. Dies gilt besonders, wenn alte Wälder durch schnelllebige Plantagen ersetzt werden. Deutschland kann hier als Beispiel dienen: 1.080 ha wurden zwischen 1991–1999 für den Bau von Autobahnen in den neuen Bundesländern gerodet. Zur gleichen Zeit wurden 2.850 ha aufgeforstet. Auf den ersten Blick ergibt dies eine positive Bilanz. Nimmt man aber den durchschnittlichen Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse (82 t C pro ha) und im Boden (107 t C pro ha) als Grundlage, summiert sich der

Kohlenstoffverlust trotz Flächenausgleich auf 146 Kt C, wobei ein 50%iger Kohlenstoffverlust aus dem Boden nach der Entwaldung sowie ein Kohlenstoffverlust im Boden nach der Aufforstung angenommen werden. Es wird über 500 Jahre dauern, bis die Veränderung im Bodenkohlenstoff wieder ausgeglichen ist. Schätzungen in der Literatur zu den Verlusten an Kohlenstoffvorräten nach der Umwandlung von Wäldern in landwirtschaftliche Flächen reichen von 24% (Murty et al., 2002) bis 63% über 90 Jahre in einer Studie amerikanischer Agrarökosysteme (Kucharik et al., 2001). Diese Beispiele veranschaulichen die Schwierigkeit, eine Referenz (Baseline) zu definieren, zumal die Aktivitäten der Entwaldung und Aufforstung an unterschiedlichen Stellen und zeitlich verschoben stattfinden.

- **ARD (Afforestation, Reforestation und Deforestation – Aufforstung, Wiederbewaldung und Entwaldung) in CDM-Ländern:** Schulze et al. (2003) belegten, dass Wiederaufforstungen nach Entwaldungen in tropischen Regionen eine negative Kohlenstoffbilanz aufweisen. Große Gebiete in den Tropen sind mit *Imperata cylindrica* bedeckt, einer aggressiven Gras-Spezies mit geringem Futterwert. Ihre oberirdische Biomasse von 8,5 t C pro ha gelangt in gewissen Abständen in die Atmosphäre, wenn Weideland verbrannt wird, um den Futterwert für die Viehherden zu verbessern. Ist die Wiederaufforstung dieser gewaltigen Gebiete eine Möglichkeit, Kohlenstoffvorräte aufzubauen, oder sollte man eher *Imperata* nutzen, deren Nettoprimärproduktion als ein C4-Gras größer ist als die eines Waldes? In Algerien wird derzeit das Gras *Stipa tenesissima* verwendet.
- Der Anteil an der Kohlenstoffspeicherung wurde in der Forstwirtschaft auf 15% begrenzt. Dies war das Ergebnis von Verhandlungen und beruht auf der Annahme, dass seit 1990 nur 15% der Kohlenstoffsinken Wald in der Forstwirtschaft auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen sind und somit anrechenbar seien. Die tatsächliche CO₂-Speicherung in Wäldern aufgrund von Managemententscheidungen seit 1990 liegt aber höher (Wirth et al., 2003).

Abb. 4.3-1 zeigt, dass beim Management ein großes Potenzial besteht, die europäischen Netto-Kohlenstoffsinken zu erweitern. Allerdings bleibt strittig, welche Instrumente hier angemessen wären:

- **Landwirtschaft:** Es wurde vorgeschlagen, geringe Bodenbearbeitung (low tillage) zur Reduktion von Kohlenstoffemissionen zu nutzen. Dies erfordert aber entweder eine verstärkte Verwendung von Herbiziden und genetisch veränderten, Herbizid-resistenten Kultivaren, die Verbrennung von Rückständen oder den Wechsel von Getreidear-

ten, was regelmäßig tiefes Pflügen notwendig macht. In vielen Gegenden Europas werden Zuckerrüben, Kartoffeln oder andere Knollenfrüchte im Wechsel mit Getreide angebaut. Das hierfür notwendige Pflügen setzt Kohlenstoff frei, der zuvor bei geringer Bodenbearbeitung im Boden gehalten wurde. Rotation von Land- und Weidewirtschaft, wie etwa die Verwendung von Luzerne, kann die Verluste ausgleichen, die allerdings größer ausfallen, wenn andere Treibhausgase einbezogen werden. Die Möglichkeit, die Kohlenstoffvorräte zu vergrößern, muss auch mit Blick auf den Beitrag der Landwirtschaft zum Energiesektor bewertet werden.

- **Forstwirtschaft:** Zahlreiche Optionen sind zur Vergrößerung der Kohlenstoffsinken Wald durchdacht worden. Zum jetzigen Zeitpunkt ist unsicher, ob es eine obere Begrenzung der potenziellen Senkenfunktion von Waldböden gibt. Wirth et al. (2003) haben Alternativmodelle bei der Biomasse durchgerechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass es schwierig ist, die Biomasse deutscher Wälder zu erhöhen, weil die Bestandsdichte bereits hoch und nachhaltiges Management seit langem vorrangiges Ziel der Forstwirtschaft ist. Folgende Optionen sind betrachtet worden:

VERÄNDERUNGEN DER LÄNGE DER ROTATIONS- PERIODE

Steigt das Alter eines Rotationswaldes, nimmt kurzfristig auch die Kohlenstoffspeicherung zu. Übergangsweise führt das zu einer ungleichmäßigen Altersstruktur, die zum einen zu Schwankungen und langfristig zu einem Wechsel von einer Senke zu einer Quelle führt, zum anderen aber auch zu einer Vermehrung der Holzprodukte, die zum Teil fossile Brennstoffe ersetzen. Zusätzlich zeigen aktuelle Trends in der Forstindustrie eine gegenläufige Entwicklung. Besonders bei den Kernholzbäumen haben junge Bäume mit einem hohen Anteil an Splintholz (einfache Behandlung mit Chemikalien) einen großen Marktanteil erreicht. Das Managementziel für Kiefern ist, frühzeitig junge Bestände zu ernten. Diese Veränderung im Management wird zu einem großen Verlust an Kohlenstoffsinken, einschließlich der Böden, führen. Der Klimawandel könnte aber auch durch Emissionen, die durch das Abholzen alter Bestände entstehen, erheblich beschleunigt werden.

WECHSEL VOM ROTATIONSWALD ZU EINEM WALD MIT UNGLEICHMÄSSIGER ALTERSSTRUKTUR

Ausgewähltes Einschlagen führt nicht notwendigerweise zu größerer Biomasse (Wirth et al.,

2003). Dieses Managementsystem wurde entwickelt, um Stämme von hoher Qualität, nicht aber möglichst viel Biomasse pro Fläche zu produzieren. Deshalb kann die durchschnittliche Biomasse bei Rotationsforstwirtschaft höher sein als bei Wäldern mit differenzierter Altersstruktur.

WECHSEL VON NADEL- ZU LAUBWALD

Obwohl es durch diesen Wechsel anfangs zu einem Kohlenstoffverlust kommt, können langfristig die Kohlenstoffbestände steigen (Fischer et al., 2002b). Aus der Modellierung eines Wechsels von Nadel- zu Laubwald schließen Wirth et al. (2003), dass der bilanzierbare mittlere Kohlenstoffgewinn bei ungefähr 0,1 t C pro ha und Jahr liegt, weil die Veränderung über einen sehr langen Zeitraum stattfindet (ungefähr 200 Jahre).

ERHÖHUNG DER KOHLENSTOFFVORRÄTE IM TOHOLZ

Bewirtschaftete Wälder in Europa haben nur eine geringe Menge an Totholz. Das Ernten ganzer Bäume trägt dazu bei. Trotzdem ist die Erhöhung der Kohlenstoffvorräte im Totholz langfristig eine viel versprechende Option für den Klimaschutz, da die mittlere Verweilzeit von Totholz signifikant höher ist als die von Waldprodukten (Wirth et al., 2003), deren energetische Nutzung nicht berücksichtigt ist. Das hat Konsequenzen für die Bilanzierung der Entwurzelung von Bäumen durch Stürme.

VERMEIDUNG DER ABHOLZUNG VON WÄLDERN UND SCHAFFUNG VON SCHUTZGEBIETEN

Die Vermeidung von Abholzung erhöht die potenziellen Kohlenstoffsenken. Sowohl geschützte als auch Primärwälder erreichen eine maximale Biomasse, die höher ist als bei bewirtschafteten Wäldern (Mund und Schulze, 2003). Offensichtlich gibt es weitere Prozesse, die zu Unterschieden zwischen unbewirtschafteten und bewirtschafteten Wäldern führen. Die Kohlenstoffvorräte im Totholz und im Boden sind in unbewirtschafteten Waldflächen höher. Mit dem hohen Anteil an geschützten alpinen Wäldern in Österreich, Slowenien und der Slowakei kann man wahrscheinlich die hohe Effektivität der Waldsenke in diesen Ländern erklären (Abb. 4.3-1).

4.5.2

Mit der Bestimmung von Senken verbundene Probleme

Kohlenstoffsenken werden in der Land- und Forstwirtschaft sowie beim CDM mit unterschiedlichen

Methoden ermittelt. Dadurch sind die Berechnungen kaum nachvollziehbar und Vergleiche schwierig. Die einzige Gemeinsamkeit der drei Methoden besteht darin, dass die Länder Projekte auswählen können, bei denen Kohlenstoffgewinne auftreten, während Situationen vernachlässigt werden, bei denen Kohlenstoff emittiert wird. Wenn das Vorzeichen der Nettoveränderungen wechselt und Länder zwischen 1990 und 2008 zu Emittenten werden, werden sie (bis 2005) den Artikel 3.4 nicht anwenden oder sich auf den Gewinn im Jahr 1990 im Vergleich zur Verpflichtungsperiode 2008–2012 beziehen. In der Forstwirtschaft werden Verluste zwischen 1990 und 2007 in den nationalen Berichten an die UNFCCC aufgeführt, jedoch nicht dem Kioto-Protokoll zugerechnet, weil sie vor der Verpflichtungsperiode 2008–2012 stattgefunden haben. Beim CDM ist die Veränderung im Vergleich zu einer Referenzentwicklung anrechenbar; das Ergebnis hängt von der Auswahl der Referenz ab. Wenn der Kohlenstoffvorrat vor der Abholzung von Wäldern die Referenz darstellen würde, wäre keines der CDM-Aufforstungsprojekte eine Senke. So zeigen Houghton et al. (1999) für die USA, dass die Abholzung in der Vergangenheit die Basis für die derzeitige Kohlenstoffsenke der USA darstellt. Die Annex-I-Länder müssen 2005 entscheiden, ob sie die Bilanzierung von bewirtschafteten Senken gemäß Artikel 3.4 erlauben wollen.

4.6

Bewertung der Bonn-Vereinbarung und Überlegungen für zukünftige Verpflichtungsperioden

Die Bewertung zeigt, dass die derzeitigen Art. 3.3 und 3.4 des Kioto-Protokolls und der Text in den Bonn-Vereinbarungen nicht geeignet sind, zum Klimaschutz beizutragen:

- Der aktuelle Text fördert die Kohlenstoffsequestrierung auf großer Fläche nicht.
- Das Kioto-Protokoll stellt keine Mechanismen zur Verfügung, um die großen Kohlenstoffvorräte unberührter und langfristig gewachsener Waldbestände zu schützen.
- Die Akkumulation von Biomasse in bewirtschafteten Wäldern kann nur einen Aufschub darstellen, weil sie zu einem späteren Zeitpunkt geschlagen werden. Deshalb sind diese Senken im Sinne des Kioto-Protokolls nicht dauerhaft, obwohl der Wald weiterhin dazu dient, den Klimawandel aufzuhalten und Waldprodukte dazu genutzt werden können, fossile Brennstoffe zu ersetzen.

Bei der Frage nach der „Permanenz“ biologischer Senken in der Forstwirtschaft muss berück-

sichtigt werden, dass die Umtriebszeit (das ist die Zeit des Wachstums bis zur nutzbaren Baumgröße) in Europa zwischen 80 und 300 Jahren liegt. Damit ist diese Sequestrierung langfristiger, als der in diesem Gutachten betrachtete Zeitraum. Moderne Forstwirtschaft zeichnet sich dadurch aus, dass Bestände eine unterschiedliche Altersstruktur aufweisen. Das führt einerseits dazu, dass sie Schwankungen der Kohlenstoffvorräte ausgleichen können, andererseits dazu, dass sie nicht anrechenbar sind, weil ein solch ungleichmäßiger Bestand nicht zu Nettoveränderungen der Biomasse führt, selbst wenn ein nachhaltiger Holzeinschlag stattfindet.

Geht man von diesen Schwächen des aktuellen Kioto-Protokolls bei der Erfassung terrestrischer Kohlenstoffquellen und -senken aus, scheint es angebracht, Änderungen für zukünftige Verpflichtungsperioden zu fordern. Diese Änderungen umfassen:

- *full carbon accounting*: Der EU-Forschungsverbund CarboEurope hat bereits während der 6. Vertragsstaatenkonferenz der UNFCCC in Bonn empfohlen, Artikel 3.3 und 3.4 zusammenzufassen und die Bewertung auf Grundlage des full carbon accounting vorzunehmen. Für die Atmosphäre spielen einzelne Managementkomponenten der Forstwirtschaft keine Rolle: Wichtig sind die regionalen Veränderungen der Kohlenstoffvorräte und die Gesamtemissionen der Landwirtschaft, die in die Atmosphäre gelangen. Die aktuellen Probleme der Überprüfung resultieren hauptsächlich aus der Vorstellung, dass direkte und indirekte anthropogene Faktoren getrennt betrachtet werden müssen, und nicht aus der fehlenden Technik. Die Überprüfung aller Kohlenstoffquellen und -senken (und nicht selektiver Anteile) ist auf allen Ebenen möglich und kann trotz ihrer natürlichen geografisch und jahreszeitlich bedingten Variabilität auf allen Skalen kontrolliert werden. Dabei beeinflusst der Nettofluss (fossil plus Landoberfläche) die Atmosphäre und nicht partielle Flüsse. Er induziert damit den Klimawandel. Durch das System des full carbon accounting würde die Trennung in direkte und indirekte anthropogene Effekte vermieden. Zusätzlich würden verschiedene räumliche Skalen als Teil der Überprüfung zugrunde gelegt (das upscaling von terrestrischen Beobachtungen muss dem downscaling der atmosphärischen Beobachtungen entsprechen). Das kann nicht im Rahmen des Kioto-Protokolls erfolgen.
- *Erhaltung von Kohlenstoffvorräten*: Aufgrund der Emissionen aus der Landnutzung und der Veränderung der Landnutzung scheint die Erhaltung der vorhandenen Kohlenstoffvorräte wichtiger als die Ausweitung von Senken. Das bestehende

Bilanzierungssystem ist für bewirtschaftete Systeme nicht geeignet oder führt zu Situationen, in denen nur Senken, aber keine Quellen angegeben werden.

Darüber hinaus ist die gegenwärtige Form des Kioto-Protokolls für das Forstmanagement ungeeignet: (1) Das ausgewählte minimale Gebiet für Projekte ist zu klein und wird den Möglichkeiten des Managements nicht gerecht; (2) Die dauerhafte Klassifizierung eines Gebiets entweder als „Kioto-Wald“ oder „Nicht-Kioto-Wald“ führt zu Interessenkonflikten zwischen einer Abschwächung des Klimawandels und Optionen des Forstmanagements; (3) Es besteht ein Konflikt zwischen dem Fokus auf Aktionen, die von Menschen verursacht werden, und der Multifunktionalität von Wäldern; (4) Die Tatsache, dass vormals unbewirtschafteter (ursprünglicher) Wald weder im Bilanzierungsschema noch in der Referenz erfasst wird, verhindert Emissionen aus der primären Ausbeutung dieser Waldflächen nicht; (5) Unterschiedliche Bilanzierungsschemata für Landwirtschaft, Forstwirtschaft und CDM führen zu einer hohen Intransparenz des gesamten Prozesses und erleichtern es Ländern, ihre Senken anrechnen zu lassen, während sie ihre Quellen bei der Landnutzung nicht ausweisen.

Das Problem der Forstwirtschaft ist, dass in den Wäldern sehr große Kohlenstoffvorräte gespeichert sind, die innerhalb kurzer Zeit freigesetzt, jedoch nur in relativ geringen Mengen über lange Zeiträume wieder aufgebaut werden können. Die Zeitkonstanten für Zerstörung und Regeneration unterscheiden sich wie bei den Böden um Größenordnungen. Ein Baum ist in fünf Minuten gefällt, es bedarf aber 50 Mio. Minuten, bis ein Baum auf eine nutzbare Größe gewachsen ist. Die Asymmetrie von Zerstörung und Regeneration wird im aktuellen Kioto-Protokoll nicht berücksichtigt, weil es die Bilanzierung von Kohlenstoffsinken explizit ausschließt („das bloße Vorhandensein von Kohlenstoffspeichern ist nicht anrechenbar“).

5.1

Volle Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen und -vorräten (full carbon accounting)

Um einen effektiven Klimaschutz zu gewährleisten, müssen alle Treibhausgasemissionen erfasst werden, neben CO₂ also auch Methan, Lachgas und andere klimawirksame Gase. Zur Vergleichbarkeit sollten die Treibhausgase – wie im Kioto-Protokoll vorgesehen – in äquivalente CO₂-Emissionen („Treibhausgaskorb“) umgerechnet werden.

INSTITUTIONELLE TRENNUNG VON EMISSIONSMINDERUNGEN UND ERHALTUNG DER KOHLENSTOFFVORRÄTE

Für die Emissionen von Treibhausgasen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe und die Verteilung der Reduktionspflichten sollte der Ansatz „Verringerung und Konvergenz“ (Contraction and Convergence – C&C) verwendet werden. Treibhausgasvorräte in der terrestrischen Ökosphäre sollten davon getrennt behandelt werden. Der Beirat spricht sich für ein eigenes „Vorräteprotokoll“ aus, das die Klimarahmenkonvention (UNFCCC) ergänzen sollte. In diesem Protokoll sollte u. a. auch die Anrechenbarkeit von Auf- und Wiederaufforstungsprojekten geregelt sein. In den Kapitel 5.2–5.4 geht der Beirat zunächst auf die mögliche Ausgestaltung des Protokolls zur Begrenzung der Emissionen von Treibhausgasen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe ein. In Kapitel 5.5 wird die Grundidee eines separaten Protokolls zu Kohlenstoffvorräten und Senken vorgestellt.

VERLÄSSLICHE INVENTARE FÜR EMISSIONEN UND VORRÄTE

Zu den Voraussetzungen für ein effektives internationales Klimaschutzregime zählen verlässliche und detaillierte Treibhausgasinventare. Hierunter sind sowohl regelmäßige, zuverlässige Berichte über Veränderungen der Vorräte als auch detaillierte Angaben über Ausmaß und sektorale Herkunft der Treib-

hausgasemissionen zu verstehen (IPCC et al., 1996; IPCC, 2001e).

Darüber hinaus ist mit weiteren Anforderungen an die Inventare zu rechnen, wenn ein full carbon accounting für die Quellen und Senken der terrestrischen Biosphäre (Kap. 4) eingeführt wird. Dazu bedarf es einer vollständigen Erfassung aller Vorräte und Flüsse sowohl für natürliche als auch für bewirtschaftete Ökosysteme.

5.2

Das Regime der „Verringerung und Konvergenz“ für Treibhausgasemissionen

Der WBGU empfiehlt für eine zweite Verpflichtungsperiode im Kioto-Protokoll den Ansatz zur „Verringerung und Konvergenz“, der eine lineare Konvergenz der Emissionsanteile zu gleichen Pro-Kopf-Emissionsrechten bis zum Jahr 2050 vorsieht (Kap. 3). Im Idealfall würden dann alle Staaten absolute Obergrenzen für die Emission von Treibhausgasen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe übernehmen. Hierdurch würde die bisher im Kioto-Protokoll vorgenommene Unterscheidung zwischen Annex-I-Staaten und Nicht-Annex-I-Staaten entfallen. Damit stünden die Möglichkeit der Gemeinsamen Erfüllung („bubbles“, z. B. Lastenteilung der EU gemäß Art. 4 UNFCCC) ebenso wie die flexiblen Mechanismen des Emissionshandels und der Gemeinsamen Umsetzung grundsätzlich allen Staaten zur Verfügung. Um die Bereitschaft zur Übernahme der Emissionsobergrenzen zu fördern, sollten auch die übrigen Instrumente, insbesondere der Zugang zu den Klimafonds (Kap. 5.5.1), von der Teilnahme an C&C abhängig gemacht werden.

Sollte sich allerdings herauskristalisieren, dass einzelne Entwicklungsländer nicht in der Lage bzw. nicht bereit sind, von Anfang an absolute Emissionsbegrenzungen zu akzeptieren, hält der Beirat eine Sonderklausel für wirtschaftlich wenig leistungsfähige und relativ emissionsarme Länder für tolerabel (Toleranzklausel). Das modifizierte C&C-Regime sähe in Anlehnung an eine reduzierte Form

des Mehrstufenansatzes (Kap. 3) so aus, dass Staaten nur dann absolute Emissionsobergrenzen übernehmen müssen, wenn sie einen bestimmten Schwellenwert eines Indikators überschreiten, der sich etwa an den Pro-Kopf-Emissionen und dem Pro-Kopf-Einkommen orientiert. Länder, die diesen Wert nicht erreichen, dürften auf Antrag die Toleranzklausel in Anspruch nehmen und müssten vorerst keine absoluten Emissionsobergrenzen einhalten. Damit das Klimafenster trotz einer Toleranzklausel eingehalten werden kann, müssten sich die an C&C teilnehmenden Länder verpflichten, die verbleibenden Reduktionslasten unter sich aufzuteilen. Der Schwellenwert muss daher so angesetzt werden, dass die zusätzlichen Lasten für die teilnehmenden Länder tragbar sind. Das Toleranzkriterium ist außerdem so zu wählen, dass zumindest alle wirtschaftlich fortgeschrittenen Entwicklungsländer und die Schwellenländer in die Verpflichtungen einbezogen werden. Da Entwicklungsländer ohne absolute Emissionsobergrenze nicht am Emissionshandel teilnehmen können, dennoch aber in den internationalen Klimaschutz eingebunden sein sollten, empfiehlt sich bei diesem modifizierten Ansatz, das Instrument des CDM grundsätzlich beizubehalten. Durch die Möglichkeit, CDM-Gutschriften in den Emissionshandel einzubringen, könnten zudem die an C&C teilnehmenden Länder entlastet werden.

Der WBGU sieht die Gefahr, dass sich einzelne Staaten der Übernahme von Emissionsobergrenzen gänzlich verweigern und ein Trittbrettfahrer-Verhalten einnehmen könnten. Für diesen Fall hat das in London ansässige Global Commons Institute, auf welches das C&C-Modell zurückgeht, eine „Global Climate Community“ vorgeschlagen: Eine Gruppe von Kernstaaten (EU, einige Umbrella-Staaten, Entwicklungsländer) übernimmt Emissionsreduktionen nach dem Prinzip des C&C. Der Beirat empfiehlt selbst bei Fernbleiben wichtiger Länder, dass die Koalition freiwilliger Teilnehmer am Grundgedanken des C&C-Zuteilungsansatzes festhält. Der Beirat betont jedoch ausdrücklich, dass dann das Klimaschutzziel mit hoher Wahrscheinlichkeit verfehlt würde und zwar umso deutlicher, je mehr Großemittenten sich dem Regime verweigern. Ziel der Vorreiter muss es folglich sein, den Teilnehmerkreis möglichst rasch und umfassend zu erweitern. Positive Anreize allein dürften zu kurz greifen. Diejenigen finanziellen Mittel, die andererseits notwendig wären, um die Teilnahme aller Trittbrettfahrer zu „erkaufen“, wären nicht aufzubringen. Daher sollten die freiwilligen Teilnehmer vereinbaren, dass sie gegebenenfalls politische und ökonomische Sanktionen gegenüber Trittbrettfahrern ergreifen werden.

5.3

Verbesserung der Treibhausgasinventare

Die Klimarahmenkonvention verpflichtet alle Vertragsstaaten, also auch die Entwicklungsländer, zur Aufstellung von Inventaren für alle Treibhausgase, die nicht durch das Montrealer Protokoll kontrolliert werden (Art. 4.1 und 12 UNFCCC). Allerdings werden derzeit an Anlage-I-Staaten höhere Anforderungen gestellt, was die Vollständigkeit und Genauigkeit sowie die Häufigkeit der Informationen angeht. Den am wenigsten entwickelten Ländern (LDC) ist freigestellt, wie regelmäßig sie berichten.

Bei der Einführung von C&C müssten für alle Länder die gleichen Anforderungen wie heute bei den Anlage-I-Staaten gelten. Diese müssen jährlich ihre Inventare offenlegen, die außerdem von internationalen Experten begutachtet werden. Weiterhin gibt es zusätzliche Verpflichtungen aus dem Kioto-Protokoll. Diese Anforderungen werden allerdings noch nicht von allen Anlage-I-Staaten erfüllt (Herold, 2003). Korrekte Angaben über die Emissionen von Treibhausgasen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe sind eine zentrale Bedingung für die Realisierung des vom Beirat befürworteten C&C-Ansatzes. Hier erhalten grundsätzlich alle Länder/Regionen direkt absolute Emissionsobergrenzen und können am Emissionshandel partizipieren. Wenn Entwicklungsländer vollständig in den Handel integriert werden sollen, sind neben Angaben zu CO₂-Emissionen auch differenzierte Bilanzen anderer, in dieser Ländergruppe besonders wichtiger Emissionen notwendig, wie z. B. Methan oder Lachgas.

Bisher haben zahlreiche Staaten keine verlässlichen Inventare aufgestellt. Dies liegt zum einen daran, dass vielen Entwicklungsländern die erforderlichen technischen, finanziellen und/oder institutionellen Voraussetzungen für die Aufstellung regelmäßiger und vollständiger Inventare fehlen. Zur Reduzierung solcher Hindernisse bedarf es zusätzlicher Maßnahmen in der technischen Zusammenarbeit. Deren Finanzierung sollte jedoch nicht zu Lasten der ohnehin knappen Mittel der Entwicklungszusammenarbeit gehen, sondern durch eine zusätzliche Aufstockung der GEF erfolgen (Kap. 5.5.1). Auch ein Begutachtungsverfahren, wie es für Anlage-I-Staaten vorgeschrieben ist, würde die Qualität der Inventare deutlich erhöhen (Herold, 2003).

Vor allem existieren derzeit auch politische Vorbehalte gegenüber der Erstellung und Pflege zuverlässiger Inventare (IEA, 2001). Diese Widerstände lassen sich voraussichtlich ausräumen, wenn die Übernahme von Emissionsobergrenzen zu Beginn wirtschaftlich möglichst attraktiv gestaltet und

gleichzeitig die Teilnahme am Emissionshandel auch den Entwicklungsländern nur gestattet wird, wenn die Inventare anspruchsvollen qualitativen Anforderungen genügen. Die Attraktivität hängt also vom Zuteilungsverfahren für Emissionsrechte und von der Gestaltung des Emissionsrechtehandels ab. Je höher die voraussichtlichen Einnahmen aus dem Emissionsrechtehandel sind, desto größer ist der Anreiz zur Teilnahme und damit auch die Bereitschaft und Fähigkeit zur Inventarisierung. Der vom Beirat favorisierte C&C-Ansatz erfüllt diese Anreizfunktion vor allem für die ärmeren Entwicklungsländer, die Nettoverkäufer von Emissionsrechten sein werden. Entwicklungsländer, die infolge relativ hoher Pro-Kopf-Emissionen in naher Zukunft ihr Emissionsniveau werden senken müssen, haben dagegen geringere Anreize.

Wenn jedoch durch eine Toleranzklausel verschiedenen Ländern die Möglichkeit eingeräumt wird, vorerst keine Emissionsobergrenzen anzunehmen, bietet die Teilnahme am Emissionshandel keinen hinreichenden Anreiz zur Inventarisierung. Diese Länder können dann ohnehin nicht am Emissionshandel teilnehmen. Stattdessen würde dann der CDM solche Anreize schaffen: Seine Inanspruchnahme ist ebenfalls an die Einhaltung bestimmter, wenngleich weniger anspruchsvoller Inventarisierungserfordernisse geknüpft. Dabei sollte weniger die Qualität als vielmehr die Bereitschaft zur Inventarisierung im Vordergrund stehen. Damit der CDM diese Anreizfunktion erfüllen kann, ist sicherzustellen, dass die Bereitschaft dieser Länder zur Erstellung verlässlicher Inventare tatsächlich zur Bedingung für die Anrechenbarkeit von Gutschriften gemacht wird, die aus CDM-Projekten in diesen Ländern resultieren.

5.4

Weiterentwicklung der flexiblen Mechanismen

5.4.1

Clean Development Mechanism

ZUKÜNFTIGE BEDEUTUNG DES CDM

Der Clean Development Mechanism (CDM) gilt als das wichtigste Instrument des Kioto-Protokolls, um Staaten, für die keine verbindlichen Reduktionsziele in der ersten Verpflichtungsperiode bestehen, an internationalen Klimaschutzaktivitäten zu beteiligen. CDM-Gutschriften können gemäß der Beschlüsse von Marrakesch in den Emissionshandel einfließen. Schätzungen über das Marktvolumen des

CDM im Jahr 2010 liegen bei 0,2–2,6 Mrd. t CO₂-Äquivalenten, die Zahlungsströme werden auf 10–50 Mrd. US-\$ geschätzt (KfW, 2001). Diese Schätzungen beziehen die USA als voraussichtlich größten Nettolieferanten von Emissionsrechten ein. Neuere Schätzungen ohne die USA beziffern den erwarteten Mitteltransfer für die erste Verpflichtungsperiode 2008–2012 auf lediglich 1,5–10,7 Mrd. US-\$ (Michaelowa et al., 2003).

Auch bei einer Einführung von C&C und damit einer Ausweitung der beteiligten Staaten dürfte der CDM seine zentrale Anbindungsfunktion zunächst nicht verlieren, weil vermutlich nicht alle Staaten von Anfang an vollständig in den Emissionshandel integriert sein werden: Zum einen, weil nicht alle die Inventarisierungserfordernisse erfüllen, zum anderen, weil der modifizierte C&C-Ansatz ermöglicht, dass bestimmte Länder temporär nicht teilnehmen (Toleranzklausel). Schließlich muss im Zusammenhang mit Fragen der institutionellen Umgestaltung auch an die – aus Sicht des Beirats wenig zukunftsweisende – Möglichkeit gedacht werden, dass sich die Vertragsstaaten nicht auf C&C mit Beteiligung aller Länder einigen werden, sondern auf eine modifizierte Fortschreibung des Kioto-Protokolls. Daher behandelt der Beirat im Folgenden sinnvolle Ansätze zu einer Weiterentwicklung des CDM.

ANBINDUNGSFUNKTION DES CDM STÄRKEN

Die Kernziele des CDM sollten nach Auffassung des WBGU die Förderung von technischen Klimaschutzprojekten in Entwicklungsländern und die Heranführung dieser Länder an die Übernahme absoluter Emissionsobergrenzen bzw. an den Emissionsrechtehandel sein. Daher sollten möglichst viele der nicht vollständig in das Reduktionssystem integrierten Länder in den CDM einbezogen werden. Bisherige Erfahrungen mit CDM in der AIJ-Projektphase (Activities Implemented Jointly) lassen indes vermuten, dass Projekte meist nur in denjenigen Entwicklungsländern durchgeführt werden, in die auch der Großteil der Auslandsdirektinvestitionen fließt (Michaelowa et al., 2003). Damit CDM-Projekte vermehrt auch an anderen, ökonomisch weniger attraktiven Standorten stattfinden, sollten mehr internationale Mittel zur Schaffung der infrastrukturellen und institutionellen Grundvoraussetzungen für CDM-Projekte bereitgestellt werden. Dazu könnte etwa der Least Developed Countries Fund dienen (Kap. 5.7). Denkbar wären auch Anreize zur Durchführung von CDM in bislang vernachlässigten Ländern oder speziell in LDC – z. B. in Form höherer CDM-Gutschriften. Dies könnte allerdings Verzerrungen zulasten der anderen Länder hervorrufen und/oder die ökologische Effektivität des globalen Klimaschutzes mindern.

MITNAHMEEFFEKTE REDUZIEREN UND „PERVERSE“ ANREIZE VERMEIDEN

Die bisherigen Vorläufer der CDM-Projekte sind häufig ökologisch fragwürdig oder durch Mitnahmeeffekte gekennzeichnet. Es werden Gutschriften für Projekte beantragt, die ohnehin – also auch ohne das Kioto-Protokoll und dessen flexible Mechanismen – durchgeführt worden wären. Insbesondere bei Senkenprojekten setzen die momentanen Kriterien zur Anrechenbarkeit zusätzlich „perverse“ Anreize, d. h. der CDM fördert die Vernichtung von Kohlenstoffvorräten, etwa von Primärwäldern (Kap. 4). Daher müssen strengere Auswahlkriterien angelegt werden. Entscheidend zur Vermeidung von Mitnahmeeffekten ist vor allem eine klare und bindende Definition der Zusätzlichkeit im Vergleich zum Referenzfall. Die internationale Klimapolitik unterscheidet zwischen Zusätzlichkeitskriterien für Projekte im Bereich der Senken und anderen CDM-Projekten. Der WBGU behandelt zunächst nur CDM-Projekte ohne Senkenbezug, weil nach seiner Auffassung Senken ab der zweiten Verpflichtungsperiode gänzlich aus dem CDM ausgegliedert werden sollten (Kap. 4 und 5.5).

ANSATZ DER „ZUSÄTZLICHKEIT VON INVESTITIONEN“

Für Projekte ohne Senkenbezug wurden in Marrakesch drei alternative Ansätze vereinbart, mit denen Antragsteller die eingesparten Treibhausgasemissionen berechnen können, also die Emissionen, die ohne CDM stattgefunden hätten (Referenzfall). Zwei der Ansätze gehen vom Status Quo als Referenzfall aus und geben daher nur bedingt Auskunft über das Emissionsvolumen, das ohne CDM tatsächlich freigesetzt worden wäre. Der dritte Ansatz mit zusätzlichen Investitionen (investment additionality) kommt diesem Anspruch näher. Als Referenz dient die Menge an Emissionen, die ausgestoßen würde, wenn der Investor die Technologie einsetzen würde, die aus betriebswirtschaftlichen Gründen die „geeignete“ wäre, um einen bestimmten Bedarf, z. B. an Energie, vor Ort zu befriedigen. Setzt er eine betriebswirtschaftlich weniger günstige Technologie ein, die aber weniger Treibhausgase emittiert, erhält er CDM-Gutschriften in Höhe des Emissionsunterschieds.

Zu den Schwächen dieses theoretisch eleganten Ansatzes der Zusätzlichkeit von Investitionen zählt, dass seine Standardisierung äußerst schwierig ist. Zum einen gibt es unterschiedliche Methoden der Kosten-, Leistungs- und Investitionsrechnung, zum anderen spielen subjektive Kriterien bei der Festlegung der entscheidenden Parameter eine große Rolle. Außerdem erhöht der Ansatz infolge der aufwändigen Berechnung und Überprüfung die Kosten

von CDM-Projekten. Würde der Ansatz verpflichtend, würde dies die Verbreitung von CDM-Projekten behindern und die ökonomische Effizienz des Klimaschutzes reduzieren. Der WBGU hält es daher für nicht zielführend, den Ansatz der Zusätzlichkeit von Investitionen als verpflichtende Methode für *alle* CDM-Projekte erneut in die Verhandlungen einzubringen. Stattdessen sollte dieser Ansatz lediglich für Großprojekte verpflichtend gemacht werden. Als Kriterien könnten ansonsten sowohl die Projektkosten als auch das Volumen der beantragten CDM-Gutschriften herangezogen werden.

POSITIV- ODER NEGATIVLISTEN VON PROJEKTEN

Die Gefahr, dass CDM-Gutschriften für nichtnachhaltige Projekte erteilt werden, kann durch Positiv- oder Negativlisten von Projekten verringert werden. Der Ausschluss bestimmter Projekttypen in Form einer Negativliste hätte gegenüber einer Positivliste den Vorteil, dass ihre Formulierung weniger vorausschauende Informationen erfordert, den Akteuren mehr Flexibilität einräumt und somit im Allgemeinen weniger restriktiv auf die Verbreitung von CDM-Projekten wirkt. Andererseits ist eine Negativliste weniger zielgenau. Sie kann ferner zumindest in der subjektiven Wahrnehmung der Akteure stärker diskriminierend als eine Positivliste erscheinen. Entsprechend könnte sich eine Einigung auf grundsätzlich nicht förderungswürdige Projekte als noch schwieriger erweisen.

Der WBGU empfiehlt, die Idee einer Positivliste, die bereits von den Vertragsstaaten abgelehnt wurde, vorerst nicht wieder aufzugreifen. Stattdessen sollte das Konzept der Prioritätenliste verfolgt werden, das für bestimmte Projekttypen erleichterte Antrags- und Prüfungsverfahren vorsieht (WWF, 2000). Zusätzlich könnten Gutschriften aus Projekten, die aufgrund ihres Typs nicht als prioritär eingestuft werden, mit weniger als 100% im Emissionsrechtehandel anerkannt werden. Schließlich plädiert der WBGU aufgrund seiner negativen Einschätzung der Kernenergie (WBGU, 2003) dafür, dass die weiche Formulierung der Vertragsstaaten über nukleare Projekte so verändert wird, dass diese nicht anrechenbar sind (Ein-Punkt-Negativliste).

CDM-PROJEKTE NICHT DURCH EINE GEBÜHR BEHINDERN

Die Absicht der Vertragsstaaten, den Anpassungsfonds durch eine Gebühr in Höhe von 2% des Wertes der durch CDM erzeugten Emissionsgutschriften zu finanzieren, stellt eine generelle Schlechterstellung von CDM-Gutschriften gegenüber anderen flexiblen Mechanismen dar. Diese Gebühr dürfte das CDM-Volumen verringern und so seine Einbindungsfunktion beeinträchtigen. Hinzu kommt, dass

zumindest ein Teil der Gebühr voraussichtlich auf die Entwicklungsländer abgewälzt wird. Dies würde nicht nur die Anreize zur Teilnahme an CDM-Projekten senken, sondern wäre auch verteilungspolitisch fragwürdig.

Gebühren sollten nicht allein auf den CDM erhoben werden, der bei C&C langfristig ohnehin entfallen wird. Denkbar wäre eine Abgabe für alle Transaktionen im Rahmen der flexiblen Mechanismen, deren Höhe sich idealerweise nicht an den Erfordernissen des Klimaschutzfonds ausrichten, sondern möglichst nur die administrativen Kosten widerspiegeln sollte, die durch den Einsatz der flexiblen Instrumente entstehen. Für die Finanzierung der Fonds sind andere Lösungen anzustreben, die den Prinzipien einer gerechten und zuverlässigen Finanzierung eher entsprechen (Kap. 5.7).

5.4.2

Gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation)

Die projektbezogene Zusammenarbeit zwischen zwei Annex-I-Ländern hatte in der Pilotphase der gemeinsamen Umsetzung (Activities Implemented Jointly – AIJ) nur eine nachgeordnete Bedeutung. Insbesondere durch die Einbeziehung der Gutschriften in den Emissionshandel dürfte die Bedeutung der gemeinsamen Umsetzung während der ersten Verpflichtungsperiode weiter sinken.

Daher ist über die vollständige Überführung der gemeinsamen Umsetzung in den Emissionshandel nachzudenken. Einerseits könnte so der umweltpolitische Instrumentenkasten vereinfacht werden. Andererseits könnte der Fortbestand jedoch sinnvoll sein, um laufende CDM-Projekte – allerdings nicht Senkenprojekte – weiterzuführen, indem sie in Projekte der gemeinsamen Umsetzung umgewandelt werden. Das Konzept der gemeinsamen Umsetzung könnte darüber hinaus bei Projekten hilfreich sein, die von der Einbringung in den Emissionshandel ganz oder teilweise ausgeschlossen sind.

Daher plädiert der WBGU dafür, die gemeinsame Umsetzung gegen Ende der ersten Verpflichtungsperiode zu überprüfen, mit der Option, den Mechanismus im Emissionshandel aufgehen zu lassen bzw. mit dem gegebenenfalls weiter bestehenden CDM zu verschmelzen. So könnten etwa JI-Projekte, die derzeit zwischen Annex-I-Staaten vereinbart sind, die nicht ihre Inventarisierungspflichten erfüllen, in einen modifizierten CDM überführt werden.

5.4.3

Emissionshandel

MARKTLIQUIDITÄT SICHERN

In verschiedenen Studien zum zukünftigen Emissionshandel werden Befürchtungen geäußert, dass es zu einem Angebotsüberhang (verursacht z. B. durch Großemittenten wie den USA, die ihren Verpflichtungen nicht nachkommen bzw. dem Regime fernbleiben), zu Angebotsengpässen infolge unerwartet hoher Emissionsvermeidungskosten oder zu strategischem Horten von Emissionszertifikaten kommen könnte (Michaelowa et al., 2003). Die Folge wären unangemessene Zertifikatspreise, die entweder sehr niedrig oder sehr hoch ausfallen, sowie extreme Preisschwankungen. Die Funktionsfähigkeit des Preismechanismus und die Stabilität eines Marktes hängen u. a. von der Liquidität und der Zahl der Teilnehmer ab. Insoweit empfiehlt sich auch aus diesem Grund ein Regime zur Verteilung von Reduktionspflichten, das für eine möglichst hohe Zahl von Ländern absolute Emissionsobergrenzen vorsieht. Der C&C-Ansatz erscheint auch deshalb besonders geeignet.

Überlegungen, den Privatsektor am internationalen Zertifikatshandel zu beteiligen, lehnt der WBGU zum jetzigen Zeitpunkt ab. Verhandlungen hierzu komplizieren den klimapolitischen Einigungsprozess, ihre Umsetzung erhöht den administrativen Aufwand. Außerdem senkt die Teilnahme der Privatwirtschaft die Volatilität der Preise nicht notwendigerweise, sondern erhöht sie sogar möglicherweise.

KLIMAZENTRALBANK ZUR GLÄTTUNG VON PREISANSTIEGEN

Die heutigen Annex-I-Staaten sowie eine wachsende Zahl anderer Länder werden nach den Ergebnissen der Szenarios spätestens auf mittlere Sicht auf den Erwerb von Emissionszertifikaten angewiesen sein. Dies setzt allerdings voraus, dass erstens die insgesamt zulässige Emissionsmenge auf das Maß reduziert wird, das zur Vermeidung einer gefährlichen Klimaveränderung erforderlich erscheint (Kap. 2), und dass zweitens ein Zuteilungsmechanismus für Emissionsrechte gemäß C&C-2050 realisiert wird. Mit dem ökonomischen Modell, das der Errechnung der Zertifikatspreise in den verschiedenen Szenarios zugrunde liegt, können zwar Aussagen über voraussichtliche langfristige Preistrends entlang von Marktgleichgewichten abgeleitet werden, der Preisbildungsprozess dürfte aber in der Praxis zu kurz- und mittelfristig abweichenden Ergebnissen führen. Es herrscht also Unsicherheit über die Entwicklung der Zertifikatspreise, etwa aufgrund nicht vorhersehbarer ökonomischer, politischer und technologischer

Entwicklungen und wegen des äußerst heterogenen Teilnehmerkreises am Handel (Baumert et al., 2003). Außerdem besteht die Gefahr deutlicher Preisanstiege, etwa infolge strategischen Verhaltens der Marktteilnehmer oder konjunktureller Schwankungen.

Der WBGU hält es für erwägenswert, durch die Einrichtung einer Klimazentralbank (Climate Central Bank – CCB) unverhältnismäßig starke Preisanstiege zu glätten. Hierdurch kann die Unsicherheit über die künftigen Kosten des Klimaschutzes begrenzt werden, was die Planungssicherheit der Unternehmen und privaten Haushalte erhöht, die letztlich die Kosten zu tragen haben. Die Eingriffe der CCB könnten dabei ähnlich ablaufen wie bei dem Konzept des Sicherheitsventils (Jacoby und Ellermann, 2002; IEA, 2002; Philibert und Criqui, 2003). Im Gegensatz zu einer starren Preisobergrenze setzt der Eingriff der CCB allerdings nicht den Marktmechanismus außer Kraft, sondern hat primär eine beruhigende Funktion: Droht der Markt Preisausschläge nach oben zu generieren, die über einer zuvor festgelegten Marge liegen, könnte die CCB zur Entknappung so viele zusätzliche Emissionsrechte gegen Entgelt ausgeben, dass der Preisanstieg das vorgegebene Maß nicht überschreitet. Ein solcher Eingriff sollte allerdings erst bei vergleichsweise hohen Preisausschlägen nach oben erfolgen, um den regulären Handelsablauf nicht zu stören.

Die Glättung dürfte einigen Ländern die Annahme von Reduktionszielen auch in politischer Hinsicht erleichtern. Allerdings würde insbesondere ein zu schnelles Eingreifen der CCB infolge einer niedrigen Volatilitätsspanne das Einhalten des langfristigen globalen Emissionsbudgets und damit die ökologische Effektivität des Klimaschutzregimes ernsthaft gefährden, wie etwa auch beim Konzept des Sicherheitsventils zu befürchten wäre (Müller et al., 2001). Daher muss ein Verfahren geschaffen werden, durch das die einmal von der CCB zusätzlich geschaffenen Zertifikate in späteren Perioden wieder eingespart werden. Das kann etwa in Phasen sinkender Preise erfolgen, in denen die CCB die zusätzlich ausgegebenen Emissionsrechte wieder vom Markt nimmt. Für den Fall, dass dies z. B. binnen 6–8 Jahren nicht gelingt, müssen die Vertragsstaaten einen Modus zur Verteilung der Emissionseinsparung festlegen. Damit die hier vorgestellte Volatilitätsspanne nicht zu einer inflexiblen Preisobergrenze degeneriert, sollte nach ihrer Überschreitung der als „normal“ angesehene Preis erhöht werden. Möglich wäre z. B. die Erhöhung um einen bestimmten Prozentsatz. Ebenso notwendig ist außerdem ein Regelmechanismus, der dafür sorgt, dass mehrjährig andauernde Überschreitungen der zulässigen Volatilitätsspanne zu einer Korrektur des als „normal“

angesehenen Preistrends führen, also dass nach mehrjähriger, andauernder Überschreitung automatisch die zulässige Volatilitätsspanne für einen festgelegten Zeitraum vergrößert, etwa verdoppelt, wird. Die CCB soll also extreme Preissprünge nach oben glätten, nicht aber den Marktpreis für Emissionsrechte von der Entwicklung der Reduktionskosten abkoppeln.

Zur Wahrnehmung der Aufgaben einer Klimazentralbank bedarf es keiner neuen internationalen Organisation. Sie könnte von einer bereits bestehenden Institution, wie etwa dem Sekretariat der UNFCCC wahrgenommen werden. Von dieser Stelle könnte auch die Koordination zwischen CCB und der Vertragsstaatenkonferenz geregelt werden, da letztere u. a. für die Erfüllungskontrolle und die Prüfung der nationalen Treibhausgasinventare zuständig ist, welche wiederum zentral für die ökologische Funktionsfähigkeit des Emissionshandels ist.

KONZEPT EINER FLEXIBLEN PREISUNTERGRENZE PRÜFEN

Der WBGU schlägt darüber hinaus vor, im Rahmen der Einrichtung der CCB die Einführung eines unteren Interventionspreises für Zertifikate oder einer Marge für Preisausschläge nach unten zu prüfen. Droht der Marktpreis unter eine politisch festzulegende Grenze zu fallen, könnte die CCB den Zertifikatspreis durch den Kauf von Zertifikaten stützen. Dafür sprechen mehrere Gründe: Sehr niedrige Preise deuten darauf hin, dass die Emissionsvermeidungskosten unerwartet gering sind. Dies rechtfertigt die Verknappung von Emissionsrechten, also ehrgeizigere Emissionsreduktionsziele. Weiterhin würden Preisuntergrenzen für ein gewisses Maß an Planungssicherheit bei den Anbietern von Emissionsrechten sorgen, da sie gegen einen völligen Preisverfall geschützt wären. Allerdings müsste der untere Interventionspreis sehr niedrig bzw. die Marge für Preisausschläge nach unten sehr hoch angesetzt werden, damit der Marktmechanismus seine Funktionen möglichst reibungslos erfüllen kann. Außerdem könnte eine zu hohe Preisuntergrenze die Bereitschaft zur Übernahme ehrgeiziger Emissions- bzw. -reduktionsziele sowohl bei den Überschuss- als auch den Defizitländern spürbar senken. Zusätzlich müsste, anders als bei dem Konzept einer Volatilitätsspanne oder eines Sicherheitsventils, das gegebenenfalls Einnahmen für die internationale Klimapolitik generiert, die Frage der Finanzierung geklärt werden. Es besteht aus Sicht des Beirats Forschungsbedarf, ob diese Probleme ebenfalls durch regelgebundene Mechanismen gelöst werden können.

VERFALLSDATUM FÜR EMISSIONSRECHTE

Es sprechen zwei Gründe dafür, die Gültigkeit von Emissionszertifikaten zeitlich einzuschränken und damit nicht nur die vorgezogene Verwendung von zukünftigen Emissionsrechten, sondern auch die Möglichkeiten der Verwendung von angesammelten, in vorherigen Perioden zugeteilten, aber nicht benötigten Emissionsrechten zu begrenzen. Zum einen könnte beliebig langes Horten zumindest hypothetisch dazu führen, dass sich zahlreiche Länder zwar zunächst mit ihren Emissionen zurückhalten, dann aber mehr oder weniger zufällig zum gleichen Zeitpunkt ein Vielfaches des üblichen Durchschnitts freisetzen. Dadurch könnte ein mittelfristig beschleunigter Klimawandel ausgelöst werden, der zumindest einem umweltschutzpolitischen Teilziel des WBGU (generelle Beschränkung der globalen Erwärmungsrate auf ein tolerables Maß) zuwiderlaufen würde. Zum anderen macht der zeitliche Verfall von Emissionsrechten das strategische Horten von Zertifikaten weniger attraktiv und würde somit Preisunsicherheiten im Emissionshandel reduzieren. Wie diese Begrenzung des Hortens im Detail erfolgt, ob etwa durch eine einmalige oder fortschreitende Entwertung der Emissionszertifikate oder eine prozentuale Beschränkung, erscheint nebensächlich.

NATIONALE EIGENLEISTUNGEN EINFORDERN

Der Beirat empfiehlt der Bundesregierung, die Vorrangigkeit nationaler Eigenleistungen auch in einer zweiten Verpflichtungsperiode zu betonen. Dafür sprechen vor allem innovationspolitische Gründe. Die Forderung, den Einsatz der flexiblen Mechanismen zur Erfüllung nationaler Reduktionsziele zu begrenzen, sollte daher wieder in die Verhandlungen eingebracht werden.

EMISSIONEN DES INTERNATIONALEN LUFT- UND SCHIFFSVERKEHRS EINBEZIEHEN

Die Emissionen des internationalen Flug- und Schiffsverkehrs sollten baldmöglichst in den Emissionshandel integriert werden. Prinzipiell wäre hierfür die Erfassung in den nationalen Emissionsbudgets erforderlich. Da dies aber mit erheblichen Zurechnungsschwierigkeiten verbunden sein dürfte, wären für diese Sektoren stattdessen auch spezifische Sonderbudgets denkbar. Alternativ bzw. vorübergehend sollten Nutzungsentgelte auf globaler oder zumindest auf europäischer Ebene erhoben werden (WBGU, 2002).

5.5

Zusätzliches Protokoll zur Erhaltung der Kohlenstoffvorräte

Die Erhaltung der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme sollte neben der Minderung der weltweiten Treibhausgasemissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe ein vorrangiges Ziel künftiger Klimaschutzregime sein. Wie in Kapitel 4 ausgeführt, misst der Beirat dem Erhalt bestehender Vorräte in terrestrischen Ökosystemen einen mindestens ebenso hohen Stellenwert bei wie der Schaffung von Senken.

Die im derzeitigen Kioto-Protokoll vorgesehene Unterscheidung von Quellen bzw. Senken, die durch direkte menschliche Einwirkung verursacht werden, und solchen, die auf indirekte oder natürliche Faktoren zurückzuführen sind, verursacht große Probleme (Kap. 4). Deswegen sollte künftig eine vollständige Erfassung aller Kohlenstoffflüsse gewährleistet werden (full carbon accounting).

Grundsätzlich könnte dazu die Erhaltung bestehender Kohlenstoffvorräte – also etwa Primärwälder oder Feuchtgebiete, aber auch Grasländer – ebenso wie die Schaffung von Senken in den Emissionshandel bzw. den CDM integriert werden. Einen Ansatz liefern hierfür die temporären Emissionsreduktionseinheiten (Temporary Certified Emission Reduction Units – TCER), die dann entsprechend nicht nur für Senken, sondern auch für den Verzicht auf die degradierende Nutzung etwa von Primärwäldern ausgestellt würden.

Der Beirat rät allerdings von einer Verrechnung der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme mit den Reduktionspflichten für Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe ab. Dagegen spricht vor allem, dass es für die Konzipierung und Einigung auf ein umfassendes System deutlich mehr Zeit bedarf als für die Aushandlung von Emissionsobergrenzen für die Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe. Während bei diesen Emissionen mit dem Kioto-Protokoll zumindest erste Schritte in die richtige Richtung vorgezeichnet wurden, müsste bei der Erhaltung von Kohlenstoffvorräten politisch nahezu bei Null begonnen werden. Ein Hemmnis für eine rasche Einigung besteht darin, dass die vorliegenden verteilungstheoretischen Analysen verschiedener Ansätze zur Zuteilung von Emissionsrechten den Erhalt natürlicher Kohlenstoffvorräte bislang nicht hinreichend integrieren. So würden sich etwa auch die Verteilungswirkungen eines C&C-Regimes, das den Erhalt von Kohlenstoffvorräten beim Emissionshandel letztlich gleich behandelt wie die Reduktion der Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe, von denen eines C&C-Regimes ohne diese

Erweiterung deutlich unterscheiden. Die einzelnen Vertragsstaaten müssten zunächst die Verteilungswirkungen verschiedener Zuteilungsansätze ermitteln, bewerten, sich neu positionieren und neue Interessensallianzen bilden. Außerdem müssten u. a. Verifikationsprobleme abschließend gelöst und die Verantwortlichkeiten für extern bzw. grenzüberschreitend verursachte Störungen der biologischen Bindung von Kohlenstoff geklärt werden. Hinzu kommen Unterschiede in der Planbarkeit bei den Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe und der Variabilität der natürlichen Flüsse.

Die Verhandlungen für eine Erweiterung des C&C-Regimes würden entsprechend sehr viel Zeit benötigen. Lange Zeitspannen des „Nichtstuns“ erscheinen angesichts des drängenden klimapolitischen Handlungsbedarfs jedoch untragbar, so dass die Reduktion der Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe ohne Verzögerung vorangetrieben werden sollte. Die vollständige Herausnahme der strittigen Frage der Anrechenbarkeit terrestrischer biologischer Senken und Quellen dürfte die Verhandlungen über Obergrenzen für die Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe sogar erleichtern, sofern parallel Verhandlungen über den Erhalt der terrestrischen biologischen Kohlenstoffvorräte aufgenommen werden. Eile ist auch hier geboten, denn ungeachtet der voraussichtlichen Verhandlungsschwierigkeiten besteht bei den biologischen Vorräten und Emissionen akuter Handlungsbedarf, weil die Menge des aus der Landnutzung freisetzbaren CO₂ den Verbrauch fossiler Brennstoffe um ein Vielfaches übersteigt (Kap. 4).

Gegenstand dieser Verhandlungen sollte ein zusätzliches Protokoll sein, das zum einen Verpflichtungen zur Erhaltung der Vorräte vorsieht und zum anderen ökonomische Anreize zum Verzicht auf eine zerstörerische Landnutzung setzt. Der Beirat plädiert dafür, diese Verpflichtungen in die Klimarahmenkonvention (UNFCCC) einzubinden – etwa als ein „Protokoll zur Erhaltung der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme“. Der Vorteil eines solchen Schwesterprotokolls könnte auch darin liegen, dass Länder, die dem Kioto-Protokoll bisher nicht beigetreten sind, stärker in den UNFCCC-Prozess eingebunden werden könnten. Dazu empfiehlt der WBGU als ersten Schritt eine Verpflichtung aller Staaten zur Inventarisierung der biologischen terrestrischen Kohlenstoffvorräte in ihren Hoheitsgebieten.

In einem zweiten Schritt müsste ein globales Ziel festgelegt und quantifiziert werden, möglicherweise differenziert nach landwirtschaftlichen und forstlichen Flächen, Weideland und Primärwäldern. In dem „Vorräteprotokoll“ würde nicht wie bisher im Kioto-Protokoll zwischen direkten menschlichen Einflüs-

sen, indirekten menschlichen Einflüssen (etwa dem CO₂-Düngeeffekt) oder natürlichen Faktoren (etwa der natürlichen Klimavariabilität) unterschieden. Die mit den Verfahren des „full carbon accounting“ erstellte, vollständige Kohlenstoffbilanz der terrestrischen Ökosphäre kann als Basis für globale Ziele verwendet werden.

In einem dritten Schritt müsste der Mechanismus vereinbart werden, nach dem die Lasten auf die Staaten verteilt werden. Zwar besteht die am einfachsten handhabbare Regelung darin, jedes Land zur weitgehenden Stabilisierung seiner Kohlenstoffvorräte zu verpflichten, gegebenenfalls differenziert nach Art der Flächen. Aber das hieße, dass die Last großteils von den Staaten getragen würde, die (noch) über große natürliche Senken verfügen. Dies könnte als ungerecht angesehen werden, aber vor allem dürften die ressourcenreichen Staaten hierzu kaum bereit sein. Daher ist zur Erhaltung der terrestrischen Ökosphäre mit ihren Kohlenstoffvorräten ein System notwendig, das alle Länder an den Kosten ihres Erhalts beteiligt und gleichzeitig Anreize für die Staaten setzt, ihre nicht nur klimapolitisch wertvollen Ökosysteme zu schützen. Vor allem natürliche Ökosysteme (etwa Primärwälder, Feuchtgebiete, Grasländer; Kap. 4; WBGU, 1998) stellen nicht nur wichtige Kohlenstoffvorräte dar, sondern weisen auch darüber hinaus den Charakter eines globalen Gemeinschaftsgutes bzw. eines Gutes von globalem Wert auf (WBGU, 2002). Es sollte daher nicht nur der Nutzen ihres Erhalts, sondern es sollten auch die Kosten ihres Schutzes auf die gesamte Staatengemeinschaft verteilt werden.

Eine Möglichkeit zur institutionellen Umsetzung dieses Mechanismus besteht in einem weltweiten System von Verpflichtungen zum Nutzungsverzicht, ähnlich wie es der Beirat bereits für die globale Biodiversitätspolitik vorgestellt hat (WBGU, 2002). Über ein System handelbarer Verpflichtungsscheine würden alle Staaten an den Kosten des Verzichts auf zerstörerische Nutzung der Kohlenstoffvorräte beteiligt. Länder, die selbst (nicht mehr) über hinreichend intakte Ökosphäre verfügen, müssten etwa Nutzungsverzichtsgarantien von anderen ressourcenreichen Ländern kaufen. Dadurch entsteht ein internationales System von marktgeregelten Kompensationszahlungen, das ressourcenreiche Länder dafür entschädigt, dass sie auf kommerzielle Erträge aus der degradierenden Nutzung der natürlichen Kohlenstoffvorräte verzichten. Ferner bewirkt der Handel, dass dort Kohlenstoffvorräte vor Zerstörung geschützt werden, wo die Opportunitätskosten der Nichtdegradierung am niedrigsten sind. Damit ist die Flexibilität und ökonomische Effizienz des Systems höher als wenn etwa jedes Land einen festen Anteil der eigenen Kohlenstoffvorräte bewahren müsste.

Damit handelbare Nutzungsverzichtseinheiten geschaffen werden können, muss die betrachtete Ressource im Idealfall homogen sein. Bei einem System handelbarer Verpflichtungsscheine in dem hier vorgeschlagenen Protokoll zur UNFCCC müsste die Bewertung der Ökosphäre, anders als etwa in der globalen Biodiversitätspolitik (Kulesa und Ringel, 2003), nur auf Grundlage des Kohlenstoffgehalts erfolgen, um die Homogenität weitestgehend zu gewährleisten. Einen Anhaltspunkt für die technische Gestaltung der Nutzungsverzichtseinheiten liefert dabei das oben dargestellte Konzept der temporären Emissionsreduktionseinheiten.

Ein derartiges System handelbarer Verpflichtungsscheine, das auf den Schutz von Landflächen – gewichtet nach ihrem Kohlenstoffgehalt – abstellt, stößt jedoch an Grenzen, wenn die Freisetzung von Kohlenstoff nicht durch eine degradierende Nutzung (z. B. Rodung) verursacht wird, sondern große Kohlenstoffverluste etwa durch den anthropogenen Klimawandel ausgelöst werden. Die Auswirkungen solcher Kohlenstoffverluste auf die globale Kohlenstoffbilanz müssten dann auf anderem Wege ausgeglichen werden. Dies sollte von der Staatengemeinschaft berücksichtigt werden, sei es im Rahmen des Vorräteprotokolls oder etwa durch weitergehende Reduktionsverpflichtungen im Bereich der Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe.

Der Beirat sieht hierin nicht die einzige Möglichkeit, das Protokoll zur Erhaltung der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme mit dem Protokoll für die anderen Emissionen, etwa dem C&C-2050-Regime, zu verbinden. Vielmehr wäre es sinnvoll, die Preise für Emissionszertifikate nach Ablauf der zweiten Verpflichtungsperiode mit den Preisen für Nutzungsverzichtseinheiten zu vergleichen. Daraus lassen sich dann Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Grenzkosten der Klimaschutzaktivitäten in beiden Bereichen ableiten. Sind die Unterschiede beträchtlich, empfiehlt es sich, die Zielvorgabe im Teilregime mit den höheren Preisen zu lockern und im anderen Teilregime gleichzeitig zu verschärfen.

Insgesamt sieht der Beirat weiteren Forschungsbedarf zu der konkreten technischen und institutionellen Ausgestaltung eines getrennten Protokolls zur Erhaltung der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme. Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf zu den Möglichkeiten, die zwei Protokolle miteinander zu verknüpfen. Dazu zählt auch die Frage, ob und unter welchen Voraussetzungen es sinnvoll ist, den Handel zwischen den beiden Systemen durchlässig zu gestalten.

5.6

Anreiz- und Sanktionsmechanismen

Die langfristige Funktionsfähigkeit eines Klimaschutzregimes, das auf die Teilnahme aller Staaten abzielt, dürfte ohne effektive Sanktionsmechanismen nicht zu gewährleisten sein. Ein wirksames Sanktions- und Anreizregime sollte die Parteien zur Übernahme und Einhaltung ihrer Verpflichtungen bewegen und die Gefahr des Trittbrettfahrens deutlich reduzieren.

5.6.1

Bestehende Sanktionsmechanismen

Nach mehreren Verhandlungsrunden wurde auf der 7. Vertragsstaatenkonferenz der UNFCCC im Jahr 2001 ein System der Erfüllungskontrolle (compliance) als Bestandteil der Marrakesch-Vereinbarung angenommen. Es sieht vor, dass Vertragsparteien, die ihr Emissionsminderungsziel verfehlen, die zuviel emittierte Menge von ihrem Emissionsrechtbudget des zweiten Verpflichtungszeitraums mit einer „Wiedergutmachungsrate“ von 1,3 abziehen müssen. Außerdem müssen sie einen Erfüllungsplan vorlegen und dürfen keine Emissionszertifikate verkaufen. Zudem wird ein Land von den flexiblen Mechanismen ausgeschlossen, wenn es seinen Berichtspflichten nicht nachkommt.

Die Entscheidung, ob einem Land diese Sanktionen auferlegt werden, wird durch den „Enforcement Branch“ des Erfüllungskontrollausschusses getroffen. Umsetzungsprobleme, die nicht unter die Nichterfüllung fallen, werden von einem „Facilitative Branch“ behandelt, der eine beratende und unterstützende Funktion hat und als eine Art Frühwarnsystem verhindern soll, dass Verpflichtungen nicht erfüllt werden.

Zwar wird erst nach Inkrafttreten des Kioto-Protokolls endgültig entschieden, ob das Erfüllungssystem rechtsverbindlich im Protokoll verankert wird, aber schon jetzt lässt sich feststellen, dass kein anderes Umweltabkommen über vergleichbar weit reichende politische Druckmittel verfügt.

5.6.2

Optionen einer künftigen Weiterentwicklung

MASSNAHMEN BEI VERLETZUNG DER VEREINBARTEN EMISSIONSOBERGRENZE

Die bestehenden Sanktionsmechanismen der ersten Verpflichtungsperiode erscheinen grundsätzlich geeignet, einer Verletzung der Emissionsobergren-

zen entgegen zu wirken. Zu bemängeln ist jedoch, dass nicht vorgesehen ist, die Sanktionen je nach den Ursachen der Verfehlung zu differenzieren. Problematisch ist in diesem Zusammenhang die Unsicherheit darüber, ob Staaten, die ihr Emissionsziel verfehlen, in ausreichender Menge Zertifikate erwerben können. Um zu verhindern, dass Staaten mit Sanktionen belegt werden, obwohl sie grundsätzlich willens sind, ihren Verpflichtungen nachzukommen, wird die Einrichtung eines Erfüllungsfonds (Compliance Fund) diskutiert (Wiser und Goldberg, 1999): Sollte ein Vertragsstaat in der Phase der Erfüllungskontrolle keine Emissionsrechte erwerben können, werden ihm zusätzlich geschaffene Zertifikate entgeltlich zur Verfügung gestellt. Die zu leistende Zahlung würde sich aus dem Zertifikatspreis und einem Aufschlag auf den Ausgabepreis zusammensetzen. Die Mittel des Erfüllungsfonds könnten in Klimaschutzprojekte fließen. Über einen solchen Fonds konnte bisher in den Verhandlungen allerdings keine Einigkeit erzielt werden.

Der Vorschlag eines derart gestalteten Erfüllungsfonds müsste indes nicht weiterverfolgt werden, wenn sich die Vertragsstaaten auf die Einrichtung einer Klimazentralbank einigen würden (Kap. 5.4.3).

Es sind bisher keine systemfremden Sanktionsmöglichkeiten für den Fall vorgesehen, dass ein Land seine Verpflichtungen nicht einhält. Zu den grundsätzlich denkbaren Sanktionsmöglichkeiten zählen Handels- oder Investitionsbeschränkungen gegenüber diesen Ländern. Allerdings wehren sich besonders die Entwicklungsländer vehement dagegen, Umweltschutzfragen mit protektionistischen Maßnahmen zu verknüpfen. Der WBGU rät davon ab, die Kooperationsbereitschaft dieser Länder durch den Vorschlag von Handelssanktionen zu strapazieren.

Im Allgemeinen wirken Sanktionsandrohungen umso glaubwürdiger, je weniger die tatsächliche Umsetzung der Sanktionen durch die beteiligten Vertragsparteien beeinflussbar ist. Angesichts des Ermessensspielraums der Entscheidungsträger kann nicht ausgeschlossen werden, dass Versuche der Beeinflussung erfolgreich bleiben. Bevor jedoch konkrete Empfehlungen etwa für die Einführung von Automatismen und fest vorgegebenen Stufen im Sanktionsverfahren ausgesprochen werden, sollten nach Ansicht des Beirates zunächst die Erfahrungen mit den bestehenden Erfüllungskontrollen ausgewertet werden.

Letztlich wird eine Reform der Erfüllungskontrollen wesentlich davon abhängen, ob und wie es gelingt, alle Länder in das C&C-Verpflichtungssystem einzubeziehen.

ANREIZE ZUR ÜBERNAHME VON EMISSIONSOBERGRENZEN

Sollten sich die Staaten nicht auf ein C&C-Regime einigen, in dem alle Länder von Anfang an Emissionsobergrenzen akzeptieren, sondern bestimmten, wirtschaftlich weniger leistungsfähigen Ländern eine Toleranzklausel einräumen, sollten Anreize geschaffen werden, um diese Länder so früh wie möglich zum freiwilligen Einstieg in das Allokationsregime zu bewegen. Dazu zählt zwingend, dass nur Länder mit einer Emissionsobergrenze am Emissionshandel teilnehmen können. Darüber hinaus wäre zu prüfen, inwieweit der Zugang zu den Klimafonds von der Bereitschaft zur Übernahme von Emissionsobergrenzen abhängig gemacht werden sollte.

MASSNAHMEN ZUR VERMEIDUNG VON TRITTBRETTFAHREN

Es sind bisher keine Sanktionsmöglichkeiten für den Fall vorgesehen, dass ein Land aus dem internationalen Klimaschutzregime austritt, nachdem es etwa vom Nettozertifikatsanbieter zum Nettonachfrager geworden ist, oder für den Fall, dass ein Land gar nicht erst teilnimmt. Staaten, die eine Teilnahme ablehnen, sollten von der Nutzung der flexiblen Mechanismen, d.h. konkret auch vom CDM, ausgeschlossen werden. Dies ist bereits für die Erfüllungskontrolle der ersten Verpflichtungsperiode vorgesehen. Darüber hinaus sollten Staaten mit Trittbrettfahrer-Verhalten keinen Zugang zu den Klimafonds erhalten (Kap. 5.7). Als wirksame Sanktion dürfte der Ausschluss von flexiblen Mechanismen und Fonds jedoch dauerhaft zu kurz greifen. Deshalb sollte über schärfere Sanktionsformen nachgedacht werden, wenngleich ihr Einsatz zu Zielkonflikten mit anderen völkerrechtlichen Vereinbarungen führen kann, wie etwa dem Allgemeinen Zoll- und Handelsabkommen bzw. der Welthandelsorganisation (Kulesa, 2003). Die „freiwilligen“ Teilnehmerstaaten sollten deutlich machen, dass sie durchaus bereit wären, verschiedene politische und ökonomische Sanktionen wie z. B. Handelsbeschränkungen gegenüber Staaten mit Trittbrettfahrer-Verhalten zu ergreifen.

5.7 Finanzierungsinstrumente

Bisher wurden drei Klimafonds unter dem Dach der GEF geschaffen. Der sog. Anpassungsfonds (adaptation fund) dient der Unterstützung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel in den besonders betroffenen Entwicklungsländern. Der Fonds soll aus einer Abgabe auf CDM-Projekte gespeist werden. Nach jüngeren Schätzungen dürfte

die Nachfrage nach CDM-Zertifikaten in der ersten Verpflichtungsperiode aber so gering sein (Jotzo und Michaelowa, 2001), dass eine erhebliche Unterfinanzierung des Fonds zu befürchten ist. Dies steht in deutlichem Gegensatz zu der künftig steigenden Bedeutung von Anpassungsmaßnahmen.

Gleiches gilt für den LDC-Fonds (Least Developed Country Fund), der die ärmsten Entwicklungsländer bei der Aufstellung nationaler Klimaschutzprogramme unterstützen soll, wie auch für den Speziellen Klimaschutzfonds (Special Climate Change Fund), der komplementär zur GEF Technologietransfer, Anpassungsmaßnahmen und Klimaschutzprogramme unterstützt. Beide Fonds werden durch freiwillige Beiträge gespeist. Zwar haben einige Industrieländer bereits Mittel zugesagt, aber die Summe erscheint insgesamt zu niedrig, um die erforderlichen Maßnahmen für eine stärkere Einbindung von Entwicklungsländern zu finanzieren. Dies gilt umso mehr, als sich zahlreiche Staaten bei Finanzierungszusagen als zurückweisend erweisen, nachdem die USA entschieden haben, das Kioto-Protokoll nicht zu ratifizieren.

Neben der Finanzierung von Anpassungsmaßnahmen und der Unterstützung von Klimaschutzaktivitäten der Entwicklungsländer hält der Beirat es in einer zweiten Verpflichtungsperiode für angemessen, zusätzlich einen Kompensationsfonds vorzusehen, aus dem Zahlungen zum Ausgleich von Klimaschäden finanziert werden. Ein weitergehendes Regime, etwa in Form einer Gefährdungshaftung, scheint hingegen aus verschiedenen Gründen problematisch. Vor allem dürfte diese Lösung schwer durchsetzbar sein, da sie mit unabsehbaren finanziellen Folgen für die betroffenen Staaten verbunden wäre. Zusätzlich müsste eine Haftung eine Reihe sehr komplexer Kausalitäts- und Beweisprobleme lösen bzw. zusätzlich eine Bewertung der Schäden vornehmen. Eine Fondslösung unter dem Dach der GEF könnte diese Schwierigkeiten umgehen.

Da die sich abzeichnende Mittelausstattung der Fonds nicht ausreicht, um Staaten enger in klimapolitische Aktivitäten einzubinden, bzw. Anpassungs- und Kompensationskosten zu tragen, ist eine rasche Neuordnung der Fonds und ihrer Finanzierung geboten. Hierfür sind jetzt die Weichen zu stellen.

Verbindliche Finanzierungszusagen sind freiwilligen ad hoc-Einzahlungen vorzuziehen. Der Finanzierungsbeitrag der einzelnen Staaten speziell für den Kompensations- und Anpassungsfonds sollte im Wesentlichen auf dem Prinzip der Verursachung basieren, sich also an den kumulierten CO₂-Emissionen eines Landes orientieren. Dabei sollte das Verursacherprinzip rückwirkend ab dem Jahr 1990 angewendet werden. Frühere Emissionen tragen zwar ebenfalls zu den Schäden und der Notwendigkeit von

Anpassungsmaßnahmen bei. Ihre Berücksichtigung im Finanzierungsschlüssel wäre aber unangemessen, weil den Entscheidungsträgern die Schädlichkeit der Emissionen erst seit der Veröffentlichung des ersten Sachstandsberichts des IPCC 1990 zwingend bekannt ist (IPCC, 1990). Bei Entscheidung darüber, wer die Mittel in Anspruch nehmen darf, sollte darüber hinaus dem Leistungsfähigkeitsprinzip Rechnung getragen werden. Es sollten also vor allem Länder mit niedrigem Pro-Kopf-Einkommen bevorzugt werden. Eine weitere Einnahmequelle könnten Nutzungsentgelte für den internationalen Luft- und Seeschiffsverkehr darstellen (WBGU, 2002). Auf jeden Fall sollte der Anpassungsfonds nicht allein durch Gebühren auf CDM-Projekte finanziert werden (Kap. 5.4.1). Vielmehr käme eine moderate, die administrativen Kosten deckende Gebühr auf alle flexiblen Mechanismen in Betracht, also im Wesentlichen auf den Handel mit Emissionsrechten.

Ferner sollte auch thematisiert werden, ob und inwieweit sich die Effizienz der Mittelverwendung durch eine eindeutigeren Aufgabenverteilung der Fonds steigern ließe. Beispielsweise sollte die Beziehung zwischen GEF und dem Speziellen Klimaschutzfonds geklärt sowie die Anpassungsfinanzierung aus letzterem ausgegliedert werden.

5.8 Instrumente globaler Energiepolitik

Klimaschutzmaßnahmen stehen – jedenfalls im Hinblick auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen – in einem engen Zusammenhang mit Maßnahmen globaler Energiepolitik. Eine Emissionsreduktion kann nur dann ohne Einbußen bei der Energieversorgung aller Menschen weltweit erreicht werden, wenn die Reduktionsmaßnahmen durch Anreize zur Veränderung von Energietechnologien begleitet werden, also z. B. durch Erhöhung der Energieproduktivität und Ausbau erneuerbarer Energien (WBGU, 2003).

Auf globaler Ebene kommt vor allem energiepolitischen Instrumenten wie etwa internationalen (handelbaren) Quoten für erneuerbare Energien sowie einer zügigen Liberalisierung des Handels mit Waren und Dienstleistungen bei den erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz große Bedeutung zu. Notwendig ist auch ein Multilaterales Energiesubventionsabkommen (MESA), das auf einen stufenweisen Abbau der Subventionen für fossile und nukleare Energieträger hinwirkt und Regeln für die Subventionierung erneuerbarer Energien und effizienterer Energietechnologien enthält. Eine globale Energiewende, die – wie vom Beirat empfohlen – mehr Nachhaltigkeit einfordert, würde gleichsam

automatisch auch einen wichtigen Beitrag zur Verringerung der Klimaproblematik leisten. Eine enge Verknüpfung globaler Klimaschutzmaßnahmen bzw. globaler Energiepolitik mit globaler Strukturpolitik sowie einer Kohlenstoff-bewußten Landnutzungspolitik (beispielsweise im Sinne kohärenter Sektorpolitiken oder strategischer Allianzen zwischen Industrie- und Entwicklungsländern) ist dabei unverzichtbar.

6.1 Abwehr gefährlicher Auswirkungen des Klimawandels dringend erforderlich

WBGU-KLIMAFENSTER EINHALTEN UND EMISSIONEN REDUZIEREN

Der WBGU begründet seine Empfehlungen zum Klimaschutz mit einem „moderaten Anthropozentrismus“ (WBGU, 1999b, 2000) und dem Vorsorgeansatz (Prinzip 15 der Rio-Deklaration; UNCED 1992; Art. 2.2 UNFCCC). Der moderate Anthropozentrismus leitet die Verpflichtung des Menschen, Natur für die heutigen und kommenden Generationen zu erhalten, aus der lebenserhaltenden und lebensverschönernden Bedeutung der Natur für den Menschen ab. Dabei geht es nicht nur um die Natur als Lebensgrundlage und Ressource, sondern auch um ihre ästhetische und kulturelle Funktion. Das Vorsorgeprinzip besagt, dass fehlende wissenschaftliche Gewissheit kein Grund dafür sein darf, Maßnahmen zur Vermeidung einer möglichen Gefahr aufzuschieben. Dabei steigen die Sicherheitsanforderungen mit dem Ausmaß und der Irreversibilität des potenziellen Schadens.

Aus diesen beiden Prinzipien leitet der WBGU die Empfehlung an die Bundesregierung ab, sich auf das Ziel zu verpflichten, die globale Erwärmung innerhalb des „WBGU-Klimafensters“ zu halten: Die Erwärmung der globalen Mitteltemperatur sollte demnach auf 2°C gegenüber vorindustriellen Werten und die maximale globale Erwärmungsrate auf 0,2°C pro Jahrzehnt begrenzt werden. Diese Rate bezieht sich auf die Änderung der globalen Mitteltemperatur, zeitlich gemittelt über mehrere Jahrzehnte. Da die globale Mitteltemperatur seit der Industrialisierung bereits um 0,6°C gestiegen ist, ist nur noch eine weitere Erwärmung von 1,4°C tolerabel.

Die Bundesregierung sollte sich in den Klimaverhandlungen für die Festschreibung dieses Ziels im Sinne einer Konkretisierung von Art. 2 UNFCCC einsetzen. Angesichts der Unsicherheiten bei der Abschätzung der Reaktion des Klimasystems auf anthropogene Emissionen empfiehlt der WBGU,

sich derzeit in den Verhandlungen nicht langfristig auf ein festes CO₂-Konzentrationsniveau als „sicheres“ Niveau im Sinne von Art. 2 festzulegen.

Vielmehr rät der WBGU zu einer „Absicherungs“-Strategie: Zunächst sollten CO₂-Ziele unterhalb von 450 ppm angestrebt werden. Sonst kann das Klimafenster bei Klimasensitivitäten jenseits von 2°C (der IPCC geht von Werten zwischen 1,5°C und 4,5°C aus) nicht mehr eingehalten werden. Daraus folgt, dass die globalen energie- und industriebedingten CO₂-Emissionen bis 2050 um etwa 45–60% gegenüber 1990 reduziert werden müssen. Die Industrieländer werden ihren Ausstoß von Treibhausgasen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe bis 2020 um mindestens 20% verringern müssen. Bis 2012 haben sie sich, bezogen auf 1990, auf eine Verringerung von 5% verpflichtet (Annex-I-Staaten).

VOLLSTÄNDIGE KOHLENSTOFFBILANZ AUFSTELLEN

Aus den Prinzipien moderater Anthropozentrismus und Vorsorgeansatz leitet der WBGU auch die Empfehlung zu einer stärkeren Berücksichtigung der terrestrischen biologischen Kohlenstoffvorräte und -senken in der Klimapolitik ab. Alle Kohlenstoffflüsse und -vorräte sollten vollständig erfasst werden (full carbon accounting). Der Beirat rät allerdings davon ab, zum jetzigen Zeitpunkt die Erhaltung der biologischen terrestrischen Kohlenstoffvorräte im gleichen System, mit dem gleichen Zuteilungsverfahren und mit denselben Instrumenten regeln zu wollen wie die Reduktionspflichten für fossile Kohlenstoffvorräte. Solche Bestrebungen könnten zu einer untragbaren Verzögerung der gesamten Klimaschutzanstrengungen führen.

ROLLE DER BIOSPHÄRE DURCH GESONDERTE VEREINBARUNG BERÜCKSICHTIGEN

Der WBGU empfiehlt, eine gesonderte zwischenstaatliche Verpflichtung zur Erhaltung der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme zu vereinbaren, etwa in Form eines „Protokolls zur Erhaltung der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme“ zur UNFCCC. Dabei würde nicht, wie bisher im Kioto-Protokoll, zwischen direkten und

indirekten menschlichen Einflüssen (etwa dem CO₂-Düungeffekt oder der Klimaänderung) oder natürlichen Faktoren (etwa der natürlichen Klimavariabilität) unterschieden. Vielmehr würde die vollständige Kohlenstoffbilanz aller Flächen gemessen und angerechnet (full carbon accounting). Ein Vorteil eines neuen Protokolls könnte darin liegen, dass Länder, die dem Kioto-Protokoll bisher nicht beigetreten sind, stärker in den UNFCCC-Prozess eingebunden werden könnten.

Der erste Schritt auf dem Weg zu solch einem Protokoll wäre die Verpflichtung aller Länder zur Inventarisierung, der zweite Schritt wäre die Festlegung eines globalen Ziels und seine Quantifizierung, möglicherweise nach Flächenarten differenziert (z. B. landwirtschaftliche oder forstliche Flächen, Weideland, Primärwald). In einem dritten Schritt müsste ein Mechanismus gefunden werden, nach dem die Lasten gerecht auf die Staaten verteilt werden. Dabei müssen ressourcenreichen Staaten Anreize zur Teilnahme gegeben werden.

Insbesondere für den Erhalt natürlicher Ökosysteme, die wichtige Kohlenstoffspeicher sind (z. B. Primärwälder, Feuchtgebiete oder Grasländer), könnte ein internationales System handelbarer Verpflichtungen zum Nutzungsverzicht eingerichtet werden, ähnlich wie es der Beirat bereits für die globale Biodiversitätspolitik vorgestellt hat (WBGU, 2002). Damit werden nicht nur der Nutzen des Erhalts der Kohlenstoffvorräte, sondern auch die Kosten ihres Schutzes auf die Staatengemeinschaft verteilt. Es entstünde ein internationales System markt geregelter Kompensationszahlungen, das ressourcenreiche Länder dafür entschädigt, dass sie auf Erträge aus der degradierenden Nutzung der natürlichen Kohlenstoffvorräte verzichten. Einen Anhaltspunkt für die technische Gestaltung der handelbaren Nutzungsverzichtseinheiten liefert dabei das Konzept der temporären Emissionsreduktionseinheiten (temporary certified emission reduction units, T-CER, UNFCCC, 2002).

UNWÄGBARKEITEN DURCH FORSCHUNG VERMINDERN

Es besteht erheblicher Forschungsbedarf, um die Unsicherheit in Bezug auf die Art und Stärke der Reaktion des Klimasystems auf die Emission von Treibhausgasen sowie auf das Verhalten von Stoffkreisläufen einzugrenzen. Wegen der potenziell katastrophalen Folgen sehr rascher Klimaveränderungen sollten die Bedingungen für ihr Eintreten intensiver untersucht werden. Auch ist eine verstärkte Forschung zu den Wirkungen von Klimaveränderungen auf Ökosysteme, Nahrungsmittelproduktion, Wasserversorgung, Gesundheit sowie die wirtschaftliche Entwicklung notwendig. Das Auftreten extremer

Wetterereignisse sowie deren veränderte Häufigkeit ist dabei besonders zu berücksichtigen. Regionale Wirkungsstudien sollten stärker den vom IPCC entwickelten Standards folgen und sich systematischer auf dessen Szenarios beziehen. Durch internationale Kooperation sollte gewährleistet werden, dass alle relevanten Regionen untersucht werden. Insbesondere gilt es, die Kausalketten von globaler Mitteltemperatur zu lokalen Klimafaktoren besser zu beleuchten.

Zur Operationalisierung von Art. 2 UNFCCC sind in der Forschung insbesondere Ansätze der integrierten Modellierung weiterzuentwickeln, die auf dem Ansatz der „tolerablen Fenster“ (Kap. 2.1.1) beruhen. Dabei wird die normative Setzung von Leitplanken und die Ermittlung der Folgen globaler Klimaänderungen von der Untersuchung zulässiger Emissionspfade sowie optimaler Strategien methodisch getrennt. Insbesondere sind hierzu neben CO₂ die Reduktionspotenziale (einschließlich der damit verbundenen Kosten) anderer Treibhausgase in entsprechende Modelluntersuchungen zu integrieren. Dadurch können kostenminimale Strategien zum Erreichen des WBGU-Klimafensters unter Einbeziehung aller klimawirksamen Gase ermittelt werden. Auch bedarf es weiterer Analysen und Forschungen zu Handeln unter Unsicherheit.

Zur Untersuchung von Minderungsstrategien und ihrer ökonomischen und anderer Auswirkungen sollte schließlich eine Vielfalt von Stabilisierungsszenarios analysiert werden. Dadurch kann das gesamte Spektrum möglicher Zukünfte berücksichtigt werden, wie sie etwa durch die SRES-Szenarios (IPCC, 2000) dargestellt werden. Dabei müssen auch Kohlendioxidkonzentrationen unterhalb von 450 ppm als Zielniveau untersucht werden.

6.2 Verpflichtungen gerecht gestalten

GLEICHE EMISSIONSRECHTE ANSTREBEN

Der WBGU gründet seine Überlegungen zusätzlich auf dem Prinzip der Gleichheit, das sich aus dem Menschenrecht auf Gleichbehandlung ableiten lässt und im Verhältnis der Vertragsparteien dem Prinzip der Gerechtigkeit entspricht („equity“; Art. 3 Ziff. 1 UNFCCC). Daraus folgert der Beirat, dass letztlich nur eine Zuordnung von Emissionsrechten nach gleichen Pro-Kopf-Anteilen als gerecht erachtet werden kann.

„VERRINGERUNG UND KONVERGENZ“ UMSETZEN
Die globalen Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe müssen langfristig deutlich vermindert werden („Verringerung“). Zusätzlich postuliert der

WBGU das Prinzip der Stetigkeit, wonach in sozio-ökonomischen Systemen sprunghafte Maßnahmen mit drastischen Auswirkungen vermieden werden sollten. Demnach ist eine plötzliche Umstellung auf eine Pro-Kopf-Zuordnung der handelbaren Emissionszertifikate nicht empfehlenswert: Die hieraus resultierenden hohen Transferzahlungen von Industrie- in Entwicklungsländer könnten zu schwer wiegenden, die Wirtschaft sämtlicher Regionen betreffenden Folgen führen. Der Beirat spricht sich aus diesen Gründen dafür aus, kontinuierlich von der heutigen Zuordnung der Anteile mit sehr hohen Ungleichgewichten bezüglich der Pro-Kopf-Emissionen hin zu einer Zuordnung nach gleichen Pro-Kopf-Anteilen überzugehen („Konvergenz“).

Nach Prüfung der in Kapitel 3 dargestellten Szenariorechnungen empfiehlt der WBGU den Ansatz der „Verringerung und Konvergenz“ (Contraction and Convergence – C&C) mit einer linearen Konvergenz der Emissionsanteile zu gleichen Pro-Kopf-Emissionsrechten bis zum Jahr 2050. Dabei sollten die Emissionen von CO₂, Methan, N₂O, HFKW, FCKW, SF₆ („Kioto-Korb der Treibhausgase“) aus Energie, Industrie, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft berücksichtigt werden. Die Emissionen anderer Treibhausgase wären entsprechend ihrem globalen Erwärmungspotenzial, wie bereits im Kioto-Protokoll geregelt, mit den CO₂-Emissionen zu verrechnen.

Sollten sich Entwicklungsländer nicht in der Lage sehen bzw. nicht bereit erklären, von Anfang an nationale Emissionsobergrenzen gemäß dem Ansatz der Verringerung und Konvergenz anzuerkennen, empfiehlt der WBGU eine Toleranzklausel für wirtschaftlich weniger leistungsfähige Länder mit relativ niedrigen Pro-Kopf-Emissionen und Pro-Kopf-Einkommen. Dazu müssten sich die Staaten auf einen Schwellenwert einigen, unterhalb dessen die Toleranzklausel in Anspruch genommen werden kann. Das Pro-Kopf-Einkommen und die Pro-Kopf-Emissionen sollten hierfür zu einem Indikator zusammengeführt werden. Überschreiten Staaten diesen Schwellenwert, sind sie zur Teilnahme am Regime globaler Verringerung und Konvergenz verpflichtet. Die Reduktionslast der Entwicklungsländer, die die Toleranzklausel in Anspruch nehmen, würde auf die teilnehmenden Länder umgelegt, um die Einhaltung des Stabilisierungsziels und somit des Klimafensters zu gewährleisten. CDM-Projekte in den nicht teilnehmenden Ländern könnten dabei eine gewisse Entlastung und Anbindung bieten. Ein derartig fließender Übergang von der jetzigen Struktur des Kioto-Protokolls (Unterscheidung Anlage-I- und Nicht-Anlage-I-Staaten) in ein Regime globaler Verringerung und Konvergenz kann indes nur gelingen, wenn die Toleranzkriterien so streng gestaltet sind,

dass die teilnehmenden Länder die zusätzlichen Reduktionslasten bewältigen können.

SANKTIONEN GEGEN TRITTBRETTFAHRER PRÜFEN

Der WBGU sieht die Gefahr, dass sich einzelne Staaten der Übernahme von Emissionsobergrenzen gänzlich verweigern und Trittbrettfahrer-Verhalten zeigen könnten. Auch dann aber empfiehlt der Beirat der Koalition freiwilliger Teilnehmer, am Grundgedanken des C&C-Allokationsansatzes festzuhalten. Der WBGU betont jedoch ausdrücklich, dass das Klimaschutzziel mit hoher Wahrscheinlichkeit verfehlt würde, wenn sich Großemittenten dem Regime verweigern. Ziel der Vorreiter muss es folglich sein, den Teilnehmerkreis möglichst rasch und umfassend zu erweitern. Zudem sollten sie vereinbaren, dass sie zu gegebenem Zeitpunkt politische und ökonomische Sanktionen gegenüber Trittbrettfahrer-Staaten ergreifen werden.

6.3

Instrumente überprüfen und verbessern

CHANCEN DES EMISSIONSHANDELS NUTZEN UND RISIKEN MINIMIEREN

Der WBGU empfiehlt, dem Emissionshandel eine internationale „Klimazentralbank“ beiseite zu stellen, um einen stabilen Emissionshandel und Planungssicherheit bezüglich der künftigen Kosten des Klimaschutzes zu gewährleisten. Diese hätte u. a. die Aufgabe, unverhältnismäßig starke Preisausschläge nach oben zu glätten. Darüber hinaus sollte die Einführung einer flexiblen Preisuntergrenze für Zertifikate geprüft werden, um Zertifikatsanbieter gegen einen Preisverfall zu schützen. Zur Funktionsweise der Klimazentralbank sowie zum Konzept der Preisuntergrenze besteht vor einer möglichen Einführung noch Forschungsbedarf. Die Einführung eines Verfallsdatums für Emissionsrechte ist zu prüfen.

Der Beirat empfiehlt der Bundesregierung, sich auch in der zweiten Verpflichtungsperiode für den begrenzten Einsatz flexibler Mechanismen zur Erfüllung nationaler Reduktionsziele einzusetzen (WBGU, 1997).

Der WBGU hält es ferner für dringlich, die Emissionen des internationalen Flugverkehrs und der Schifffahrt in den Emissionshandel zu integrieren. Alternativ wären emissionsbezogene Nutzungsentgelte für den internationalen Flugverkehr sowie die internationale Schifffahrt auf globaler oder zumindest europäischer Ebene zu erheben (WBGU, 2002).

INTEGRITÄT DURCH VERLÄSSLICHE INVENTARE GEWÄHRLEISTEN

Um die Integrität des Klimaschutzregimes zu gewährleisten, empfiehlt der WBGU, die Berechtigung zur Teilnahme am Emissionshandel an die hohe Qualität der Kohlenstoffinventare zu knüpfen. Länder, die nicht über die hierzu erforderlichen wirtschaftlichen und institutionellen Voraussetzungen verfügen, müssen hierbei in stärkerem Maße als bisher im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit unterstützt werden. Für die Teilnahme am CDM können für Entwicklungsländer weniger strenge Inventarisierungskriterien angelegt werden. Damit bleibt die Möglichkeit bestehen, die Länder durch CDM-Projekte in das Klimaschutzregime einzubinden, auch wenn sie die Anforderungen zur Teilnahme am Emissionshandel noch nicht erfüllen oder die Übernahme von Reduktionszielen ablehnen bzw. dazu noch nicht verpflichtet sind.

CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM ALS ÜBERGANGSLÖSUNG NUTZEN

Die Funktion des CDM als Instrument zur Anbindung von Entwicklungsländern, die (noch) nicht am C&C-Regime teilnehmen, sollte gestärkt werden. Daher tritt der WBGU dafür ein, dass die infrastrukturellen und institutionellen Voraussetzungen in den ärmeren Entwicklungsländern gezielt gefördert werden. Zusätzlich sollten spezielle Anreize für CDM-Projekte in den am wenigsten entwickelten Ländern geschaffen werden. Senkenprojekte sollten aus dem CDM ausgeschlossen werden, weil der WBGU für die Erhaltung der biosphärischen Kohlenstoffvorräte ein getrenntes Regime vorschlägt.

Zur Vermeidung von Mitnahmeeffekten bei CDM-Projekten empfiehlt der WBGU, den Ansatz der „Zusätzlichkeit von Investitionen“ (investment additionality) für Großprojekte verpflichtend vorzuschreiben. Bei der Beantragung von Großprojekten muss nachgewiesen werden, dass sie ohne CDM-Förderung nicht durchgeführt worden wären.

CDM-Projekte sollten zudem gegenüber den anderen flexiblen Mechanismen nicht dadurch benachteiligt werden, dass nur sie mit einer Gebühr belastet werden. Statt dessen plädiert der Beirat für eine moderate Abgabe auf alle Transaktionen im Rahmen der flexiblen Mechanismen. Diese sollte ausschließlich die administrativen Kosten des Einsatzes der jeweiligen flexiblen Instrumente decken. Der WBGU spricht sich dafür aus, das Instrument der Joint Implementation gegen Ende der ersten Verpflichtungsperiode zu überprüfen. Abzuwägen wäre dabei, den Mechanismus vollständig in dem Emissionshandel aufgehen zu lassen oder ihn mit dem CDM zu verbinden.

6.4 Klimaanpassung gerecht finanzieren

BEITRÄGE ZUR ANPASSUNG AN DIE KLIMAÄNDERUNG GERECHT VERTEILEN

Aus dem Verantwortlichkeits- (Art. 3.1 UNFCCC) und dem Verursacherprinzip leitet der WBGU die Empfehlung ab, die Beiträge eines Staates zur Finanzierung des Ausgleichs von Klimaschäden und der Anpassung an die Klimaänderung am jeweiligen Beitrag zur globalen Erwärmung auszurichten. Auch wenn die Klimaänderung innerhalb des WBGU-Klimafensters gehalten werden kann, besteht die Notwendigkeit derartiger Anpassungsmaßnahmen. Bei der Bemessung des Finanzierungsanteils sollten allerdings erst Emissionen ab 1990 berücksichtigt werden. Die Veröffentlichung des ersten Sachstandsberichts des IPCC entspricht in etwa dem Zeitpunkt, an dem die Staatengemeinschaft das Klimaproblem und die Schwere seiner Folgen erkannt hatte (IPCC, 1990). Konkret fordert der WBGU eine Aufstockung der mit den Marrakesch-Abkommen gegründeten Fonds, um Entwicklungsländern die Anpassung an die Klimaänderung zu erleichtern. Zudem empfiehlt der WBGU die Einrichtung eines Kompensationsfonds, um besonders betroffenen Staaten den Ausgleich von Klimaschäden zu ermöglichen. Dabei sollten sich die jährlichen Beiträge am jeweiligen Anteil der Staaten an den Emissionen rückwirkend bis 1990 orientieren.

SANKTIONSMECHANISMEN ÜBERPRÜFEN

Der WBGU sieht vorerst keinen wesentlichen Reformbedarf der Sanktionsmechanismen, die gegenüber Ländern vorgesehen sind, die ihren Verpflichtungen nicht nachkommen. Diese Verhandlungen sollten auf das Ende der ersten Verpflichtungsperiode verlegt werden, wenn Erfahrungen mit den bestehenden Erfüllungskontrollen ausgewertet werden können. Das schließt jedoch nicht aus, dass zu einem früheren Zeitpunkt die Frage Verhandlungsgegenstand wird, mit welchen politischen und ökonomischen Anreizen und Sanktionen den Ländern zu begegnen ist, die eine Übernahme von Verpflichtungen grundsätzlich ablehnen, wie zur Zeit zum Beispiel die USA und Australien.

6.5 Klimaschutz mit globaler Strukturpolitik kohärent verzahnen

KONVERGENZ ZWISCHEN INDUSTRIE- UND ENTWICKLUNGSLÄNDERN FÖRDERN

Um dem Gedanken einer nachhaltigen Entwicklung gerecht zu werden, müssen neben dem Klimaschutzziel auch soziale und wirtschaftliche Erfordernisse berücksichtigt werden. Damit das Klimaschutzziel langfristig zu niedrigen Kosten erreichbar ist, sollte die Klimapolitik kohärent mit globaler Struktur- und Entwicklungspolitik verzahnt werden. Ziel muss es sein, die soziale und ökonomische Konvergenz zwischen Industrie- und Entwicklungsländern sowie den Technologietransfer zu fördern. Neben einer verstärkt auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Entwicklungszusammenarbeit kann ein erster Schritt in Richtung Konvergenz die Öffnung der Märkte für die Produkte der Entwicklungsländer sein. Damit es im Zuge des Globalisierungsprozesses zu einer weltweiten wirtschaftlichen und sozialen Konvergenz bei langfristig rückläufigen Bevölkerungswachstumsraten (ab 2050) kommen kann, muss die Entwicklungszusammenarbeit weiter vertieft werden. Um ein weiteres Anwachsen der Weltbevölkerung über 2050 hinaus zu verhindern, sollten in den Entwicklungsländern Bildungs- und Gesundheitsprogramme, insbesondere solche für Frauen, sowie die Einführung sozialer Sicherungssysteme gefördert werden.

ENERGIEWENDE ZUR NACHHALTIGKEIT VOLLZIEHEN

Der WBGU betont, dass Klimaschutz ohne eine grundsätzlich neue Ausrichtung der Energiesysteme hin zur Nachhaltigkeit nicht möglich sein wird. Die vom Beirat vorgeschlagenen energiepolitischen Maßnahmen, die für eine Energiewende in Richtung auf global nachhaltige Energiesysteme erforderlich sind, sollten möglichst rasch umgesetzt werden (WBGU, 2003). Hierzu zählen etwa international handelbare Quoten für erneuerbare Energien oder eine zügige Liberalisierung des Handels mit Waren und Dienstleistungen im Bereich erneuerbarer Energien und der Energieeffizienz. Zudem sollte ein Multilaterales Energiesubventionsabkommen (MESA) abgeschlossen werden, das einen stufenweisen Abbau der Subventionen für fossile und nukleare Energieträger vorsieht und Regeln für die Subventionierung erneuerbarer Energien und effizienter Energietechnologien enthält.

Eine Einbettung der Verminderung von Treibhausgasen durch das C&C-Regime in ein System globaler energiepolitischer Maßnahmen ermöglicht weltweit Klimaschutz ohne Einbußen bei der Ener-

gieversorgung aller Menschen. Zudem werden Anreize auf der Angebots- und Nachfrageseite dafür gesetzt, dass die Energieproduktivität steigt und erneuerbare Energien erheblich ausgebaut werden. Emissionsreduktionen können so sogar mit einer verbesserten weltweiten Energieversorgung einhergehen. Schließlich ist darauf hinzuweisen, dass eine Verknüpfung globaler Klimaschutzmaßnahmen bzw. globaler Energiepolitik mit globaler Strukturpolitik unverzichtbar ist. So sollten Sektorpolitiken kohärenter gestaltet und strategische Allianzen zwischen Industrie- und Entwicklungsländern eingegangen werden. Der Beirat drängt auf konkrete Vereinbarungen, um Mindestquoten für erneuerbare Energieträger zu erreichen (WBGU, 2003) und Infrastrukturen für eine globale solare Strom-Wasserstoff-Wirtschaft zu entwickeln. Die langfristige Kohlenutzung ist selbst in modernsten Kohlekraftwerken nicht mit der Einhaltung des WBGU-Klimafensters vereinbar. Durch derartige Maßnahmen, die Emissionsminderungen durch ein C&C-Regime ergänzen und ermöglichen, schafft die Politik die Voraussetzungen für kostengünstigen Klimaschutz.

Eine unabdingbare Voraussetzung der Energiewende ist die deutliche Steigerung der Investitionen in Forschung und Entwicklung von nachhaltigen Technologien. Zur breiten Absicherung des Entwicklungspfads zur solaren Strom-Wasserstoff-Wirtschaft sollten die entsprechenden Forschungsanstrengungen verstärkt werden. Der Beirat hat in seinem Energiegutachten hierzu detaillierte Forschungsempfehlungen erarbeitet (WBGU, 2003).

ENTSCHEIDENDE WEICHENSTELLUNGEN STEHEN NOCH BEVOR

Die Staatengemeinschaft muss so schnell wie möglich entscheidende Weichenstellungen in der internationalen Klimapolitik vornehmen, wenn gefährliche Klimaänderungen vermieden werden sollen. Die Klimarahmenkonvention bietet einen unverzichtbaren Rahmen für kommende Verhandlungen. Dabei verringern sich die Handlungsspielräume mit jeder weiteren Verzögerung einer konsequenten Klimapolitik. Das vorliegende Gutachten zeigt Wege auf, mit welchen Strategien und Instrumenten dieser Herausforderung begegnet werden kann.

- Alcamo, J., Dronin, N., Endejam, N., Golubev, G. und Kirilenko, A. (2003): Will Climate Change Affect Food and Water Security in Russia? Summary Report of the International Project on Global Environmental Change and its Threat to Food and Water Security in Russia. Draft. Kassel: Universität Kassel. Center for Environmental Systems Research.
- Alley, R. B., Marotzke, J., Nordhaus, W. D., Overpeck, J. T., Peteet, D. M., Pielke Jr., R. A., Pierrehumbert, R. T., Rhines, P. B., Stocker, T. F., Talley, L. D. und Wallace, J. M. (2003): Abrupt climate change. *Science* 299, 2005–2010.
- Alverson, K. D., Bradley, R. S. und Pedersen, T. F. (Hrsg.) (2003): Paleoclimate, Global Change and the Future. IGBP-Series. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Anderson, T. L., Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Knutti, R., Boucher, O., Rodhe, H. und Heintzenberg, J. (2003): Climate forcing by aerosols – a hazy picture. *Science* 300, 1103–1104.
- Andronova, N. G. und Schlesinger, M. E. (2001): Objective estimation of the probability density function for climate sensitivity. *Journal of Geophysical Research* 106 (D19): 22,605–22,611.
- Arnell, N. W., Cannell, M. G. R., Hulme, M., Mitchell, J. F. B., Kovats, R. S., Nicholls, R. J., Parry, M. L., Livermore, M. T. J. und White, A. (2002): The consequences of CO₂ stabilisation for the impacts of climate change. *Climatic Change* 53, 413–446.
- Baumert, K. A., Perkaus, J. F. und Kete, N. (2003): Great expectations: Can international emissions trading deliver an equitable climate regime? *Climate Policy* 3, 137–148.
- Berk, M. und van den Elzen, M. (2001): Options for differentiation of future commitments in climate policy: how to realise timely participation to meet stringent climate goals? *Climate Policy* 1, 465–480.
- Bice, K. L. und Marotzke, J. (2002): Could changing ocean circulation have destabilized methane hydrate at the Palaeocene/Eocene boundary? *Paleoceanography* 17 (2), 8.1–8.10.
- Bryant, D., Nielsen, D. und Tangle, L. (1997): The Last Frontier Forests. Ecosystems and Economies on the Edge. Washington, DC: World Resources Institute (WRI).
- Caldeira, K., Jain, A. K. und Hoffert, M. I. (2003): Climate sensitivity uncertainty and the need for energy without CO₂ emission. *Science* 299, 2052–2054.
- Campbell-Lendrum, D. H., Prüss-Üstün, A. und Corvalan, C. (2003): How much disease could climate change cause? In: McMichael, A. J., Campbell-Lendrum, D. H., Corvalan, C., Ebi, K., Githeko, A., Scheraga, J. und Woodward, A. (Hrsg.): *Climate Change and Health: Risks and Responses*. Genf: World Health Organization (WHO).
- Cannell, M. G. R., Dewar, R. C. und Pyatt, D. G. (1993): Conifer plantations on drained peatlands in Britain: a net gain or loss of carbon? *Forestry* 66, 353–366.
- CBD – Convention on Biological Diversity (2003): Review of the Interlinkages between Biological Diversity and Climate Change, and Advice on the Integration of Biodiversity Considerations into the Implementation of the United Nations Framework Convention on Climate Change and its Kyoto Protocol. Dokument UNEP/CBD/SBSTTA/9/11. Internet: <http://www.biodiv.org/doc/meetings/sbstta/sbstta-09/official/sbstta-09-11-en.pdf>. Montreal: CBD-Sekretariat.
- Checkley, W., Epstein, L. D., Gilman, R. H., Figuera, D., Cama, R. I. und Patz, J. A. (2000): Effects of El Niño and ambient temperature on hospital admissions for diarrheal diseases in Peruvian children. *Lancet* 355, 442–450.
- Ciais, P., Janssens, I., Shvidenko, A., Wirth, C., Malhi, Y., Grace, J., Schulze, E. D. und Heimann, M. (2003): The potential of rising CO₂ to account for the observed uptake of carbon by tropical, temperate and boreal forest biomes. Southampton Proceedings (im Druck).
- Cincotta, R. P., Wisniewski, J. und Engelman, R. (2000): Human population in the biodiversity hotspots. *Nature* 404 (27.04.2000), 990–992.
- Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F. I., Prentice, I. C., Betts, R. A., Brovkin, V., Cox, P. M., Fisher, V., Foley, J., Friend, A. D., Kucharik, C., Lomas, M. R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A. und Young-Molling, C. (2001): Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology* 7 (4), 357–373.
- Czimczik, C. I., Preston, C. M., Schmidt, M. W. I. und Schulze, E.-D. (2003): How surface fire in Siberian Scots pine forests affects organic carbon in the forest floor: Stocks, molecular structure, and conversion to black carbon (charcoal). *Global Biogeochemical Cycles* 17, 20.1–20.14.
- Davis, M. B. und Shaw, R. G. (2001): Range shifts and adaptive responses to quaternary climate change. *Science* 292, 673–679.
- den Elzen, M. (2003): Exploring Climate Regimes for Differentiation of Future Commitments to Stabilise Greenhouse Gas Concentrations. *Integrated Assessment* 3 (4), 343–359.
- Fischer, G., M., van Velthuisen, H. T., Shah, M. M. und Nachtergaele, F. O. (2002a): Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results. Laxenburg: IIASA.
- Fischer, H., Bens, O. und Hüttel, R. (2002b): Changes in humus form, humus stocks and soil organic matter distribution caused by forest transformation in the North East lowlands of Germany. *Forstwiss. Ceb. 121*, 322–334.
- Forest, C. E., Stone, P. H., Sokolov, A. P., Allen, M. R. und Webster, M. D. (2002): Quantifying uncertainties in climate system properties with the use of recent climate observations. *Science* 295, 113–117.

- Green, R. E., Harley, M., Miles, L., Scharlemann, J., Watkinson, A. und Watts, O. (2003): *Global Climate Change and Biodiversity. Summary of Papers and Discussion*. Norwich, UK: University of East Anglia.
- Grübler, A. und Messner, S. (1998): Technological change and the timing of mitigation measures. *Energy Economics* 20, 495–512.
- Ha-Duong, M., Grubb, M. J. und Hourcade, J.-C. (1997): Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂-emission abatement. *Nature* 390, 270–273.
- Hammer, K. (1998): *Agrarbiodiversität und pflanzen genetische Ressourcen. Schriften zu genetischen Ressourcen*. Band 10. Bonn: Zentralstelle für Agrardokumentation und -information (ZADI).
- Hare, B. (2003): *Assessment of Knowledge on Impacts of Climate Change – Contribution to the Specification of Art. 2 of the UNFCCC: Impacts on Ecosystems, Food Production, Water and Socio-economic System. Externe Expertise zum WBGU-Sondergutachten „Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert“*. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_ex01.pdf. Berlin: WBGU.
- Herold, A. (2003): *Current status of national inventory preparation in Annex-I Parties and Non-Annex-I Parties*. Draft. Paris: OECD.
- Höhne, N., Harnisch, J., Philipsen, D., Blok, K. und Galleguillos, C. (2003): *Evolution of Commitments Under the UNFCCC: Involving Newly Industrialized Economies and Developing Countries*. Utrecht, Köln, Nürnberg: ECOFYS Energieberatung und Handelsgesellschaft.
- Houghton, H. A., Hackler, J. L. und Lawrence, K. T. (1999): The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. *Science* 285, 574–578.
- Hourcade, J.-C., Ha-Duong, M., Grübler, A. und Tol, R. S. J. (2001): INASUD project findings on integrated assessment of climate policies. *Integrated assessment* 2, 31–35.
- Hughes, L. (2000): Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *TREE* 15 (2), 56–61.
- Hughes, T. P., Baird, A. H., Bellwood, D. R., Card, M., Connolly, S. R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., Lough, J. M., Marshall, P., Nyström, M., Palumbi, S. R., Pandolfi, J. M., Rosen, B. und Roughgarden, J. (2003): Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science* 301 (15.08.), 929–933.
- IEA – International Energy Agency (2001): *International Emission Trading. From Concept to Reality*. Paris: IEA.
- IEA – International Energy Agency (2002): *World Energy Outlook 2002*. Paris: IEA.
- IGBP – International Geosphere Biosphere Programme/Terrestrial Carbon Working Group (Hrsg.) (1998): *The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto Protocol*. *Science* 280, 1393–1394.
- Iglesias, E., Garrido, A. und Gómez, A. (2001): *An Economic Drought Management Index to Evaluate Water Institutions Performance under Uncertainty and Climate Change*. Mailand: Fondazione Eni Enrico Mattei.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, OECD – Organisation for Economic Co-operation und IEA – International Energy Agency (Hrsg.) (1996): *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Genf: IPCC.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (1990): *First Assessment Report. Reports of Working Groups I, II and III*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2000): *Emission Scenarios*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2001a): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2001b): *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2001c): *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2001d): *Climate Change 2001: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2001e): *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Genf: IPCC.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2002): *Climate Change and Biodiversity. Technical Paper Nr. V*. Internet: <http://www.ipcc.ch/pub/tpbiodiv.pdf>. Genf: IPCC.
- Jacoby, H. D. und Ellerman A. D. (2002): *The Safety Valve and Climate Policy*. Internet: http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt83.pdf. Massachusetts, MA: MIT.
- Jackson, R. B., Banner, J. L., Jobbágy, E., Pockman, W. T. und Wall, D. H. (2002): Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature* 418, 623–626.
- Jansen, J. C., Battjes, J. J., Sijm, J. P. M., Volkers, C. H. und Ybema, J. R. (2001): *The Multi-Sector Convergence Approach. A Flexible Framework for Negotiating Global Rules for National Greenhouse Gas Emissions Mitigation Targets*. Petten: Energy Research Centre for the Netherlands (ECN).
- Janssens, I. A., Freibauer, A., Ciais, P., Smith, P., Nabuurs, G. J., Folberth, G., Schlamadinger, B., Hutjes, R. W. A., Ceulemans, R., Schulze, E. D., Valentini, R. und Dolman, A. J. (2003a): Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12 % of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science* 300, 1538–1542.
- Janssens, I. A., Freibauer, A., Ceulemans, R., Ciais, P., Dolman, H., Heimann, M., Nabuurs, G. J., Schlamadinger, B., Schulze, E. D., Smith, P. und Valentini, R. (2003b): *Winners and losers in the European carbon league*. *Nature* (im Druck).
- Jenkinson, D. S., Harkness, D. D., Vance, E. D., Adams, D. E. und Harrison, A. F. (1992): Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 24, 295–308.
- Jones, C. D., Cox, P. M., Essery, R. L. H., Roberts, D. L. und Woodage, M. J. (2003): Strong carbon cycle feedbacks in a climate model with interactive CO₂ and sulphate aerosols. *Geophysical Research Letters* 30, 32.1–32.4.
- Jotzo, F. und Michaelowa, A. (2001): *Estimating the CDM Market under the Bonn Agreement*. HWWA Discussion Paper 145. Hamburg: Hamburgisches Welt-Wirtschafts-Archiv (HWWA).

- KfW – Kreditanstalt für Wiederaufbau (2001): Diskussionsbeiträge Klimaschutz: Derzeitiger Stand der Kyoto-Instrumente CDM und JI und die mögliche Rolle der Banken bei ihrer Umsetzung. Internet: http://www.kfw.de/DE/Service/OnlineBibl48/Entwicklun38/Kfw-Materialien_Nr27.pdf. Frankfurt/M.: KfW.
- Knutti, R., Stocker, T. F., Joos, F. und Plattner, G.-K. (2002): Constraints on radiative forcing and future climate change from observations and climate model ensembles. *Nature* 416, 719–723.
- Kokott, J. (1999): Equity in International Law. In: Tóth, F. L. (Hrsg.): *Fair Weather?* London: Earthscan, 173–192.
- Krafft, T., Bissel, R. und Rosenberg, M. (2002): Health and the Environment. A Crosscutting Issue in Global Change Research. München: Nationales Komitee für Global Change Forschung (NKGCF).
- Kucharik, C. J., Brye, K. R., Normann, J. M., Foley, A. F., Gower, S. T. und Bundy, L. G. (2001): Measurements and modeling of carbon and nitrogen cycling in agroecosystems of Southern Wisconsin: Potential for SOC sequestration during the next 50 years. *Ecosystems* 4, 237–258.
- Kulesa, M. E. (2003): Vom Thunfischstrei bis Doha: Eine Zwischenbilanz zum Spannungsverhältnis zwischen Umweltpolitik und Welthandelsordnung. In: *Zeitschrift für Angewandte Umweltforschung* (im Druck).
- Kulesa, 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.
- Leemans, R. und Eickhout, B. (2003): *Analysing Changes in Ecosystems for Different Levels of Climate Change*. OECD paper ENV/EPOC/GSP(2003)5/FINAL. Paris: OECD.
- Malcolm, J. R., Markham, A., Neilson, R. P. und Garaci, M. (2002): Estimated migration rates under scenarios of global climate change. *Journal of Biogeography* 29, 835–849.
- Manne, A. und Richels, R. (1997): On stabilizing CO₂ concentrations – cost effective emission reduction strategies. *Environmental Modeling and Assessment* 2, 251–265.
- May, R. M., Lawton, J. H. und Nigel, E. S. (1995): Assessing extinction rates. In: Lawton, J. H. und May, R. M. (Hrsg.): *Extinction Rates*. Oxford: Oxford University Press, 1–24.
- Meyer, A. (2000): *Contraction and Convergence. The Global Solution to Climate Change*. London: Green Books.
- Michaelowa, A., Butzengeiger, S., Jung, M. und Dutschke, M. (2003): Beyond 2012 – Evolution of the Kyoto Protocol Regime. An Environmental and Development Economics Analysis. Externe Expertise zum WBGU-Sondergutachten „Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert“. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_ex02.pdf. Berlin: WBGU.
- Mittermeier, R. A., Myers, N., Gil, P. R. und Goettsch-Mittermeier, C. (1999): Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions. Sierra Madre: Cemex.
- 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. *PNAS* 100 (18), 10309–10313.
- Müller, B., Michaelowa, A. und Volijk, C. (2001): *Rejecting Kyoto. A Study of Proposed Alternatives to the Kyoto Protocol*. London: Climate Strategies.
- Mund, M. und Schulze, E. D. (2003): Silviculture and its interactions with the biodiversity and biogeochemistry of forest ecosystems. *Ecol. Studies*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (im Druck).
- Murray, C. J. (1994): Quantifying the burden of disease: the technical basis for disability-adjusted life years. *Bulletin of the World Health Organization* 72 (3), 429–445.
- Murty, D., Kirschbaum, M. U. F., McMurtrie, R. E. und McGilvray, A. (2002): Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology* 8, 105–123.
- Myers, N. (1998): Threatened biotas: hotspots in tropical forests. *The Environmentalist* 8, 178–208.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., de Fonseca, G. A. B. und Kent, J. (2000): Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403 (24.02.), 853–858.
- Nakicenovic, N., Grübler, A. und McDonald, A. (1998): *Global Energy Perspectives*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Nakicenovic, N. und Riahi, K. (2003a): Model Runs With MESSAGE in the Context of the Further Development of the Kyoto-Protocol. Externe Expertise zum WBGU-Sondergutachten „Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert“. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_ex03.pdf. Berlin: WBGU.
- Nakicenovic, N. und Riahi, K. (2003b): Scenario Data for MESSAGE Runs in the Context of the Further Development of the Kyoto-Protocol. Externe Expertise zum WBGU-Sondergutachten „Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert“. Unveröffentlichtes Manuskript.
- Nicholls, R. J., Hoozemans, F. M. J. und Marchand, M. (1999): Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses. *Global Environmental Change* 9, S69–S87.
- Nisbet, E. G. (2002): Have sudden large releases of methane from geological reservoirs occurred since the last Glacial Maximum, and could such releases occur again? *Philosophical Transactions of The Royal Society of London A360*, 581–607.
- NRC – National Research Council (2002): *Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises*. Washington, DC: National Academy Press.
- Oppenheimer, M. (1998): Global warming and the stability of the West Antarctic ice sheet. *Nature* 393, 325–332.
- Overpeck, J., Whitlock, C. und Huntley, B. (2003): Terrestrial biosphere dynamics in the climate system: Past and future. In: Alverson, K., Bradley, R. und Pedersen, T. (Hrsg.): *Paleoclimate, Global Change and the Future (IGBP Synthesis Volume)*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 81–111.
- Parmesan, C. und Yohe, G. (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421, 37–42.
- Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G. und Livermore, M. (1999): Climate change and world food security: a new assessment. *Global Environmental Change* 9, S51–S67.
- Parry, M., Arnell, N., McMichael, T., Nicholls, R., Martens, P., Kovats, S., Livermore, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A. und Fischer, G. (2001): Millions at risk: defining critical climate change threats and targets. *Global Environmental Change* 11, 181–183.
- Paul, K. I., Polglase, P. J., Nyakuengama, J. G. und Khanna, P. K. (2002): Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* 168, 241–257.

- Philibert, C. und Criqui, P. (2003): Capping Emissions and Costs. Internet: http://www.rff.org/post_kyoto/philibert.pdf. Washington, DC: World Resources Institute (WRI).
- Prentice, I. R., Farquhar, G. D., Fasham, M. J. R., Goulden, M. L., Heimann, M., Jaramillo, V. R., Khashgi, H. S., LeQuéré, C., Scholes, R. J. und Wallace, D. W. R. (2001): The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.): *Climate Change 2001. Working Group I*. Cambridge: Cambridge University Press, 183–238.
- Rahmstorf, S. und Ganopolski, A. (1999): Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model. *Climatic Change* 43 (2), 353–367.
- Rao, S. und Riahi, K. (2003): Long Term Multigas Mitigation Strategies Using MESSAGE. Presented at the International Energy Workshop (IEW), Juni 2003, Laxenburg, Österreich. Laxenburg: IIASA.
- Reilly, J. M., Jacoby, H. D. und Prinn, R. G. (2003): Multi-gas Contributors to Global Climate Change. *Climate Impacts and Mitigation Costs on Non-CO₂ Gases*. Pew Center on Global Climate Change.
- Rödenbeck, C., Houweling, S., Gloor, M. und Heimann, M. (2003): CO₂ flux history 1982–2001 inferred from atmospheric data using a global inversion of atmospheric transport. *Atm. Chem. Phys. Discuss* 3, 2575–2659.
- Root, T. L., Price, J. T., Hall, K. R., Schneider, S. H., Rosenzweig, C. und Pounds, J. A. (2003): Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421, 57–60.
- Rosenzweig, C., Tubiello, F. N., Goldberg, R., Mills, E. und Bloomfield, J. (2002): Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change. *Global Environmental Change* 12, 197–202.
- Schellnhuber, H.-J. (2002): Coping with Earth system complexity and irregularity. In: Steffen, W., Jäger, J. Carson, D. J. und Bradshaw, C. (Hrsg.): *Challenges of a Changing Earth*. Proceedings of the Global Change Open Science Conference, Amsterdam, Netherlands, 10–13 July 2001. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 151.
- Schiermeier, Q. (2003): Gas leak! *Nature* 423, 681–682.
- Schimel, D. S., House, J. I., Hibbard, K. A., Bousquet, P., Ciais, P., Peylin, P., Braswell, B. H., Apps, M. J., Baker, D., Bondeau, A., Canadell, J., Churkina, G., Cramer, W., Denning, A. S., Field, C. B., Friedlingstein, P., Goodlae, C., Heimann, M., Houghton, R. A., Melillo, J. M., Moore III, B., Murdiyarso, D., Noble, I., Pacala, S. W., Prentice, I. C., Raupach, M. R., Rayner, P. J., Scholes, R. J., Steffen, W. L. und Wirth, C. (2001): Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* 414, 169–172.
- Schlesinger, W. (1997): *Biogeochemistry. An Analysis of Global Change*. San Diego: Academic Press.
- Schulze, E.-D., Wirth, C. und Heimann, M. (2000): Managing forests after Kyoto. *Science* 289, 2058–2059.
- Schulze, E.-D., Valentini, R. und Sanz, M.-J. (2002): The long way from Kyoto to Marrakesh: Implications of the Kyoto protocol negotiations for global ecology. *Global Change Biology* 8, 505–518.
- Schulze, E.-D., Mollicone, D., Achard, F., Matteucci, G., Frederici, S., Eva, H. D. und Valentini, R. (2003): Making deforestation pay under the Kyoto Protocol? *Science* 299, 1669.
- Singh, R. B. K., Hales, S., de Wet, N. Raj, R., Hearnden, M. und Weinstein, Phil (2001): The influence of climate variation and change on diarrheal disease in the Pacific Islands. *Environmental Health Perspectives* 109, 155–159.
- Smith, J. B., Schellnhuber, H.-J. und Mirza, M. Q. (2001): Vulnerability to climate change and reasons for concern: a synthesis. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.): *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Chapter 19. Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 915967.
- Stocker, T. F. und Schmittner, A. (1997): Influence of CO₂ emission rates on the stability of the thermohaline circulation. *Nature* 388, 862–865.
- Swart, R., Mitchell, J., Morita, T. und Raper, S. (2002): Stabilisation scenarios for climate impact assessment. *Global Environmental Change* 12, 155–165.
- The Royal Society (2002): *Genetically Modified Plants for Food Use and Human Health – An Update*. Policy Document 4/02. London: The Royal Society.
- Toth, F. L., Bruckner, T., Füssel, H.-M., Leimbach, M., Petschel-Held, G. und Schellnhuber, H.-J. (2002): Exploring options for global climate policy. A new analytical framework. *Environment* 44 (5), 23–34.
- Trape, J. F. und Rogier, C. (1996): Combating malaria morbidity and mortality by reducing transmission. *Parasitol Today* 1, 236–240.
- UNEP – United Nations Environment Programme (Hrsg.) (2003): *GEO-Global Environmental Outlook*. Internet: <http://www.unep.org/geo/geo3/english/index.htm>. New York: UNEP.
- van Vuuren, D. und de Vries, B. (2001): Mitigation scenarios in a world oriented at sustainable development: the role of technology, efficiency and timing. *Climate Policy* 1, 189–210.
- Vesterdal, L., Ritter, E. und Gundersen, P. (2002): Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management* 169, 137–147.
- Vinnikov, K. Y. und Grody, N. C. (2003): Global warming trend of mean tropospheric temperature observed by satellites. *Science* 302, 269–272.
- Vitousek, P. M., Ehrlich, P. R., Ehrlich, A. H. und Matson, P. A. (1997): Human appropriation of the products of photosynthesis. *BioScience* 36 (6), 368–373.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (1995): *Szenario zur Ableitung globaler CO₂-Reduktionsziele und Umsetzungsstrategien*. Stellungnahme zur ersten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Berlin. Sondergutachten 1995. Bremerhaven: WBGU.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (1997): *Ziele für den Klimaschutz 1997*. Stellungnahme zur dritten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Kyoto. Sondergutachten 1997. Bremerhaven: 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 (1999a): *Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken*. Hauptgutachten 1998. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (1999b): *Welt im Wandel: Umwelt und Ethik*. Sondergutachten 1999. Marburg: Metropolis-Verlag.

- 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 (2002): Entgelte für die Nutzung globaler Gemeinschaftsgüter. Sondergutachten 2002. Berlin: WBGU.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2003): Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit. Hauptgutachten 2003. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- WHO – World Health Organization (Hrsg.) (2000): Climate Change and Human Health: Impact and Adaptation. Genf: WHO.
- WHO – World Health Organization (Hrsg.) (2002): World Health Report 2002. Reducing Risks, Promoting Healthy Life. Genf: WHO.
- WHO – World Health Organization, WMO – World Meteorological Organization und UNEP – United Nations Environment Programme (Hrsg.) (2003): Climate Change and Human Health – Risks and Responses. Summary. Genf, New York: WHO, WMO, UNEP.
- Wigley, T., Richels, R. und Edmonds, J. (1996): Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations. *Nature* 379, 240–243.
- Wilkinson, C., Linden, R., Cesar, H., Hodgson, G., Rubens, J. und Strong, A. E. (1999): Ecological and socioeconomic impacts of 1998 coral mortality in the Indian Ocean. An ENSO impact and a warning of future change? *Ambio* 28, 188–196.
- Wirth, C., Schulze, E.-D., Schwalbe, G., Tomczyk, S., Weber, G. und Weller, G. (2003): Dynamik der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern Thüringens. Bericht an das BMBF: Modelluntersuchungen zur Umsetzung des Kyoto Protokolls. Jena: MPI.
- Wiser, G. und Goldberg, D. (1999): The Compliance Fund. A New Tool for Achieving Compliance under the Kyoto Protocol. CIEL Discussion Paper. Washington DC: Center for International Environmental Law (CIEL).
- WWF – Worldwide Fund for Nature (Hrsg.) (2000): Leading the Way. How the Kyoto Protocol's Clean Development Mechanism Can Promote Sustainable Development in the South. WWF Working Paper 2. Internet: <http://www.panda.org/downloads/europe/leadingtheway.pdf>. WWF International.
- Zickfeld, K. (2003): Modeling Large-Scale Singular Climate Events for Integrated Assessment. Potsdam: Universität Potsdam. Dissertation.

Veröffentlichungen des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU)

Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit. Hauptgutachten 2002.
Berlin: Springer © 2003, 260 Seiten, € 49,95.
ISBN 3-540-40160-1

Entgelte für die Nutzung globaler Gemeinschaftsgüter. Sondergutachten 2002.
Berlin: WBGU © 2001, 52 Seiten.
ISBN 3-9807589-7-4

Die Chance von Johannesburg: Eckpunkte einer Verhandlungsstrategie. WBGU Politikpapier 1.
Berlin: WBGU © 2001, 24 Seiten.
ISBN 3-9807589-5-8

Welt im Wandel: Neue Strukturen globaler Umweltpolitik. Hauptgutachten 2000.
Berlin: Springer © 2001, 223 Seiten, € 49,95.
ISBN 3-540-41343-X

Welt im Wandel: Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Biosphäre. Hauptgutachten 1999.
Berlin: Springer © 2000, 482 Seiten, € 74,95.
ISBN 3-540-67106-4

Welt im Wandel: Umwelt und Ethik. Sondergutachten 1999.
Marburg: Metropolis-Verlag © 1999, 149 Seiten, € 14,80.
ISBN 3-89518-265-6

Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Hauptgutachten 1998.
Berlin: Springer © 1999, 350 Seiten, € 69,95.
ISBN 3-540-65605-7

Welt im Wandel: Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser. Hauptgutachten 1997.
Berlin: Springer © 1998, 419 Seiten, € 84,95.
ISBN 3-540-63656-0

Ziele für den Klimaschutz 1997. Stellungnahme zur dritten Vertragsstaatenkonferenz der
Klimarahmenkonvention in Kyoto.
Bremerhaven: WBGU © 1997. Vergriffen.

Welt im Wandel: Herausforderung für die deutsche Wissenschaft. Hauptgutachten 1996.
Berlin: Springer © 1996, 201 Seiten, € 54,95.
ISBN 3-540-61661-6

Welt im Wandel: Wege zur Lösung globaler Umweltprobleme. Hauptgutachten 1995.
Berlin: Springer © 1996, 247 Seiten, € 49,95.
ISBN 3-540-60397-2

Szenario zur Ableitung globaler CO₂-Reduktionsziele und Umsetzungsstrategien. Stellungnahme
zur ersten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Berlin.
Bremerhaven: WBGU © 1995. Vergriffen.

Welt im Wandel: Die Gefährdung der Böden. Hauptgutachten 1994.
Bonn: Economica © 1994, 278 Seiten, € 42,95.
ISBN 3-87081-334-2

Welt im Wandel: Grundstruktur globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen. Hauptgutachten 1993.
Bonn: Economica © 1993, 224 Seiten, € 34,75.
ISBN 3-87081-373-3

Alle WBGU-Gutachten können von der Internetwebsite <http://www.wbgu.de> herunter geladen
werden.

ISBN 3-936191-03-4