



WBGU

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG
GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN

materialien

**Dr. Ottmar Edenhofer, Nicolas Bauer,
Elmar Kriegler:**

Szenarien zum Umbau des Energiesystems

**Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003
"Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit"**

Berlin, Heidelberg 2003

Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003
"Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit"
Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag
ISBN 3-540-40160-1
Verfügbar als Volltext im Internet unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.html

Autor: Dr. Ottmar Edenhofer, Dipl.-Volksw. Nicolas Bauer, Dipl.-Phys. Elmar Kriegler
Titel: Szenarien zum Umbau des Energiesystems
Potsdam: Gesellschaft für Sozio-ökonomische Forschung (GSF), 2002
Veröffentlicht als Volltext im Internet unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003_ex03.pdf

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
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>

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

Szenarien zum Umbau des Energiesystems

Bericht für den

Wissenschaftlichen Beirat Globale Umweltveränderungen

Ottmar Edenhofer¹, Nico Bauer, Elmar Kriegler²

26. Juni 2002

¹PIK - Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Postfach 60 12 03, D-14412 Potsdam, Tel. (+49) (0)331-288-2565, e-mail: edenhofer@pik-potsdam.de

²Die Autoren möchten Christian Flachsland, Armin Haas, Thomas Kleinen und Kirsten Zickfeld für ihre konstruktiven Diskussionen und Mitarbeit herzlich danken.

Zusammenfassung

1. Die Sinnhaftigkeit einer Verminderung von Emissionen wird wegen der hohen Kosten häufig in Frage gestellt. Es zeigt sich jedoch, dass dies durchaus sinnvoll sein kann, wenn das Energiesystem durch eine kluge Investitionsstrategie umgebaut wird. Es kann nämlich gezeigt werden, dass eine angemessenere Modellierung des technischen Fortschritts den Blick für neue Optionen in der Energie- und Klimapolitik öffnet: **Der Umbau des Energiesystems erlaubt sowohl einen wirksamen Klimaschutz durch Verminderung von Treibhausgasemissionen als auch ein ausreichendes Wachstum der Weltwirtschaft.**
2. Bei der Verminderung von Treibhausgasen stehen fünf Optionen zur Diskussion: **Bevölkerungspolitik, Suffizienz, Steigerung der Energieeffizienz, Verminderung der Kohlenstoffintensität und Geo-Engineering.** Die Transformation des Energiesystems umfaßt im wesentlichen die Erhöhung der Energieeffizienz und die Substitutionsstrategie. Beim Geo-Engineering geht es im wesentlichen darum, die Deponie Atmosphäre auszutauschen gegen die Deponie geologische Formationen oder Ozean. Sowohl der tiefe Ozean als auch die geologischen Formationen könnten die vorhandenen fossilen Energiebestände aufnehmen. Allerdings sind diese Optionen umstritten, da unklar ist, ob der Ozean oder auch die geologischen Formationen tatsächliche sichere, gesellschaftliche akzeptierte und institutionell durchsetzbare Deponien für CO₂ sind. Es stellt sich jedoch die Frage, ob auf diese Optionen verzichtet werden, wenn zugleich - aus unterschiedlichen Gründen - mit hohem Bevölkerungswachstum zu rechnen ist und ein hohes Wirtschaftswachstum ermöglicht werden soll.

3. Um diese Frage zu beantworten, werden hier vier Szenarien entworfen und mit Hilfe des Modells MIND durchgerechnet.
- (a) **Im BAU Szenario werden hohe Wachstumsraten des Sozialproduktes erreicht, allerdings erreicht die globale Mitteltemperatur Größenordnungen, die die Resilienz des natürlichen Systems bei weitem überfordern dürfte.** Obwohl es auch in diesem Szenario zu einem Umbau des Energiesystems im 22. Jahrhundert aufgrund knapper fossiler Ressourcen kommt, ist dieser Strukturwandel viel zu langsam, um einen effizienten Klimaschutz zu ermöglichen.
 - (b) **Ein Umbau des Energiesystems, der im wesentlichen durch erneuerbare Energien getragen wird, ist durchaus ohne Wohlfahrtsverluste möglich, wenn im Sektor der erneuerbaren Energien zügige learning by doing Effekte realisiert werden.** Die Szenarienrechnungen zeigen zwar, dass Energie- und Kohlenstoffintensität in einem Maße sinken müssten, für die es bislang keine historischen Vergleichsmaßstäbe und Vorbilder gibt. Allerdings sind die dafür erforderlichen Produktivitätsgewinne bei den erneuerbaren Energien durchaus in einer plausiblen Größenordnung.
 - (c) **Das Szenario eines effizienteren fossilen Energiesystems erlaubt einen wirksamen Klimaschutz, es kommt aber mittelfristig zu einem deutlich verminderten Pro-Kopf Konsum gegenüber dem BAU-Szenario.** Dieses Szenario ist allerdings nur dann plausibel, wenn man davon ausgeht, dass die Wirtschaft relativ unelastisch auf neue Herausforderungen reagiert.
 - (d) **Der relativ rasche Umbau des Energiesystems mit relativ hohen Wachstumsraten wäre ein wünschenswertes Szenario. Allerdings stößt dieses Szenario auf wirtschaftliche Widerstände.** Die Besitzer fossiler Ressourcen werden weiter auf die Umsetzung von Geo-Engineering Optionen drängen. Dies einmal darum, weil sie erhebliche Verluste ihrer Renteneinkommen hinnehmen müssten, wenn es zu einer nennenswerten Begrenzung der Emissionen kommen sollte. Die ist gleichbedeutend mit einer Entwertung ihrer Eigentumsrechte. Darüber hinaus entwertet auch der technische Fortschritt im Sektor der erneuerba-

ren Energien ihrer Renteneinkommen. Die Option des Geo-Engineerings könnte daher eine wirksame Möglichkeit sein, trotz des notwendigen Klimaschutzes, die fossilen Energiereserven für den Rest dieses Jahrhunderts zu nutzen. Allerdings ist diese Option mit ökonomischen und ökologischen Risiken behaftet. Die Abschätzung dieser Risiken erfordert sowohl weitere Forschungen als auch eine gesellschaftliche Debatte über die Zukunft der Energieversorgung.

4. Wir diskutieren die politischen Möglichkeiten, den Umbau des Energiesystems zu beeinflussen. **Es stellt sich heraus, dass das Zusammenspiel von Erwartungen, Investitionsentscheidungen und technischem Fortschritt entscheidend dafür ist, welcher Entwicklungspfad eingeschlagen wird.** Vor diesem Hintergrund erscheint sowohl das Kyoto-Protokoll als auch die Post-Kyoto Phase in einem neuen Licht. Gelingt es nämlich in der Post-Kyoto Phase, die Erwartungen der Investoren so zu stabilisieren, dass diese mit moderaten Emissionsverminderungen glaubhaft rechnen müssen, kann dieses Reduktionsziel ohne Wohlfahrtseinbußen erreicht werden. Können durch einen rechtzeitigen Aufbau eines erneuerbaren Energiesektors ausreichend Produktivitätsgewinne realisiert werden, so kann es zu einer über die ursprünglichen Leitplanken hinausgehenden Emissionsverminderung kommen. Diese zusätzlichen Emissionsverminderung liegt dabei im rein wirtschaftlichen Interesse, um eine kostengünstige Energieversorgung zu sichern. Entscheidend für den Erfolg dieser Politik ist nicht so sehr, wann genau es zu verbindlichen Reduktionsverpflichtungen kommt, sondern ob diese glaubhaft erwartet werden können. Mit Hilfe von Emissionskorridoren identifizieren wir wichtige Faktoren, die den Handlungsspielraum der Politik und Wirtschaft beeinflussen.
5. **Das Konzept der naturräumlichen und sozio-ökonomischen Resilienz ist ein geeigneter Zugang, um die Option des Umbaus des Energiesystems in eine größere gesellschaftspolitische Debatte einzubetten.** Nur in einer Welt, die weder fatalistisch noch unbegründet optimistisch ist, lassen sich sinnvolle Managementoptionen identifizieren. Wir gehen davon aus, dass sich zwei grundlegende Managementoptionen ergeben. In einem ersten Pfad wird das fossile Energiesystem bis zum Ende des Jahrhunderts schrittweise abgelöst durch ein Energiesystem, das im wesentlichen auf erneuerbaren

Energie beruht. Da im 22. Jahrhundert ohnehin die fossilen Ressourcen knapp werden, ist diese Option auch langfristig nachhaltig. Dieser Umbau ist darum notwendig, weil das Klimasystem sein Gleichgewicht nicht mehr aufrecht erhalten kann, wenn die Treibhausgase einem BAU-Pfad folgen. Allerdings wird dieser Umbau nur gelingen, wenn sich Wirtschaft und Gesellschaft als hinreichend elastisch oder resilient erweisen. Diese Resilienz hängt entscheidend von der Fähigkeit der Wirtschaft zur Innovation ab. Die zweite Option geht davon aus, dass die sozialen Lernprozesse, die nötig sind, um den Umbau des Energiesystems zu ermöglichen, zu langsam verlaufen. Wirtschaft und Gesellschaft haben also nur eine geringe Resilienz. Da die Resilienz der Atmosphäre bei einem BAU-Pfad überfordert wird, bleibt nur die Möglichkeit, nach einem natürlichen Teilsystem zu fahnden, das die Treibhausgase aufnehmen kann, ohne dabei seine Resilienz einzubüßen. Die Lagerung von CO_2 im tiefen Ozean oder in geologischen Formationen erscheint daher vielen als die wichtigste Option für Klimaschutz. Die ökonomischen und ökologischen Risiken sind beträchtlich. Will man diese Risiken vermeiden, muß die Resilienz von Wirtschaft und Gesellschaft erhöht werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Das politische Dilemma	4
1.2	Das moralische Dilemma	6
1.3	Klimapolitik auf der Anklagebank	7
1.4	Der Aufbau des Berichts	8
2	Problemstellung	9
2.1	Die Problematik der Kosten-Nutzen-Analyse	10
2.2	Die Kosten-Effektivitäts-Analyse	11
2.3	Der Leitplankenansatz	17
2.4	Die Modellierung des technischen Fortschritts	18
3	Der Umbau des Energiesystems als langfristige Klimaschutzoption	21
3.1	Der Einfluss von CO ₂ im Vergleich zu anderen Treibhausgasen	22
3.2	Welche Optionen gibt es?	30
3.2.1	Bevölkerung	32
3.2.2	Suffizienzstrategie	35
3.2.3	Effizienzstrategie	36
3.2.4	Substitutionsstrategie	36
3.2.5	Geo-Engineering	39
3.3	Randbedingungen des Energiesystems	45
3.3.1	Energiesicherheit	45
3.3.2	Verfügbarkeit von Ressourcen und Reserven	46
3.4	Schlussfolgerung	48

4	Szenarienrechnungen	49
4.1	Der Rahmen der Analyse	49
4.1.1	Das Modell MIND	51
4.1.2	Das Optimierungsproblem	60
4.1.3	Die Endogenisierung des technischen Fortschritts - das Lernkurvenkonzept	62
4.2	Szenario BAU: Fossile Zukunft unter Vernachlässigung des Klimas . .	69
4.2.1	Die stilisierten Fakten des Wachstums	70
4.2.2	Ökologische Modernisierung	79
4.3	Szenario UmBAU: Klimaschutz durch Umbau des Energiesystems . .	82
4.3.1	Die zentrale Rolle der steigenden Skalenerträge	83
4.3.2	Der Einfluss der Ressourcenbasis	87
4.3.3	Klimasensitivität	89
4.4	Szenario EFFIZIENZ: Klimaschutz durch Steigerung der Energieeffizienz	92
4.5	BAU + Carbon Sequestration	96
5	Klimaschutz nach Kyoto	98
5.1	Leitplanken des Handlungsspielraums	100
5.1.1	Zur Interpretation des Tolerable Windows Approach	100
5.1.2	Leitplankensetzung	103
5.2	Emissionskorridore	106
5.3	Umbau des Energiesystems unter Emissionsbeschränkungsszenarien .	111
5.3.1	Emissionsbegrenzungsszenarien für die Post-Kyoto-Zeit	113
5.3.2	Diskussion der Ergebnisse	116
5.4	Leitplanken zur Impulsgebung und Erwartungsstabilisierung	122
5.4.1	Stabilisierung der Erwartung und steigende Skalenerträge . . .	122
5.4.2	Das Sicherheitsventil	124
6	Grundzüge einer neuen Energie- und Umweltpolitik	126
6.1	Die Idee der Resilienz in Natur- und Gesellschaftsbildern	126
6.2	Stabilisierung von Erwartungen und steigende Skalenerträge	130
6.3	Marktwirtschaft und Ordnungspolitik	131
A	Parameterwerte und Sensitivitätsanalyse	134

Kapitel 1

Einleitung

Die Menschheit unternimmt eines ihrer größten geophysikalischen Experimente im Erd-System. Seit 200 Jahren erhöht sie die CO₂ Konzentration in der Atmosphäre. Dies hat wahrscheinlich einen Anstieg der globalen Mitteltemperatur zur Folge, für den der Menschheit schlicht die historischen Vergleichsmaßstäbe fehlen. Folgt daraus schon, dass CO₂ Emissionen vermindert werden müssen? Ja sagen diejenigen, die davon überzeugt sind, dass eine Verdreifachung der Konzentration in der Atmosphäre zu irreversiblen Schäden des Klimasystems führen würde. Sie fordern eine aktive Klimapolitik mit dem Ziel, das weltweite Energiesystem auf eine kohlenstofffreie Wirtschaft umzustellen. Nein, sagen die Energiepolitiker, die befürchten, dass eine drastische Verminderung der CO₂-Emissionen die Weltwirtschaft und vor allem die Entwicklungsländer durch hohe Energiepreise und niedriges Wirtschaftswachstum nachhaltig schädigen würde. Der Umbau des Energiesystems in den nächsten 50 Jahren hin zu einer kohlenstofffreien Wirtschaft sei ein Experiment, für das der Menschheit ebenfalls die historischen Vergleichsmaßstäbe fehlen - ein Experiment wahrscheinlich, das die Anpassungsfähigkeit der Weltwirtschaft überfordere.

1.1 Das politische Dilemma

Der IPCC kommt zu dem Ergebnis, dass ein Umbau des Energiesystems zu vertretbaren Kosten möglich ist (IPCC, Working Group III). Diese positive Einschätzung kann jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Energiepolitik nicht nur die Interessen der kommenden Generationen berührt, sondern machtvolle Akteure wie China, die OPEC oder die OECD auf den Plan ruft. So hat die OPEC das Ziel,

ihre Ölbestände so lange wie möglich zu nutzen oder sogar durch Exploration zu erweitern [Grubb, 2001]; auch Länder wie China wollen ihre Kohleressourcen für ihre industrielle Entwicklung verwerten. Aus einer klimapolitischen Perspektive wäre es aber sinnvoll, wenn ein Großteil der vorhandenen fossilen Energiebestände ungenutzt bliebe. Eine solche Klimapolitik würde de facto die Besitzer von Kohle, Öl und Gas enteignen. Es ist also kaum verwunderlich, dass eine präventive - also eine auf Vermeidung von Treibhausgasen ausgerichtete - Klimapolitik bedeutenden Widerstand hervorrufen wird.

Die Energiepolitik der meisten OECD Staaten stand und steht im Dienste der Wachstumspolitik; ihre Aufgabe besteht in der Sicherung einer preisgünstigen Energieversorgung. An diesem Ziel haben sowohl Unternehmen als auch Verbraucher ein vitales Interesse. Eine aktive Klimapolitik wird als Bedrohung für ein anhaltendes Wirtschaftswachstum empfunden. Diese Besorgnis kann sich durchaus auf wirtschaftswissenschaftlichen Sachverstand stützen [Nordhaus and Boyer, 2000]. Da aber Wirtschaftswachstum eine notwendige Bedingung für nahezu alle anderen gesellschaftspolitischen Ziele ist, erscheint eine präventive Klimapolitik als aussichtslos.

Nach dem 11. September 2001 ist vielen Staaten in der OECD erneut bewußt geworden, wie abhängig sie von den Staaten der sogenannten strategischen Ellipse sind. Innerhalb der strategischen Ellipse befinden sich Länder wie Iran, Irak, Saudi-Arabien, aber auch die Staaten am Kaspischen Meer. Diese Länder verfügen über 70% der weltweiten Ölreserven und über 60% der weltweiten Gasreserven. Aus der Sicht der OECD-Staaten wäre es durchaus wünschenswert, diese Abhängigkeit zu verringern. Ob dies aber zu einer Verminderung des fossilen Energieverbrauchs führen wird, ist fraglich. Zum einen werden derzeit die Explorations- und Extraktionsanstrengungen für Öl verstärkt; dies könnte durchaus dazu führen, dass Öl zu relativ stabilen Preisen außerhalb der strategischen Ellipse verfügbar wird; zum anderen könnte die Abhängigkeit von der strategischen Ellipse auch durch vermehrte Nutzung von Kohle vermindert werden; klimapolitisch wären beide Optionen kontraproduktiv.

Auf der Ebene der Nationalstaaten wird der Macht- und Interessenskonflikt zwischen Energie- und Klimapolitik medienwirksam zwischen Wirtschafts- und Umweltminister ausgetragen: Der Umweltminister verteidigt eine präventive Klimapolitik als Gebot der Nachhaltigkeit, der Wirtschaftsminister lehnt sie mit dem Hinweis auf die hohen Kosten ab.

Eine Verringerung der Emissionen scheint klimapolitisch zwar vernünftig, aber kaum durchsetzbar. Eine Vermeidungsstrategie, die energiepolitisch vertretbar wäre, scheint wiederum klimapolitisch wirkungslos zu bleiben, weil sie de facto auf einen business-as-usual Pfad für die Weltwirtschaft hinauslaufen würde. Dieses politische Dilemma ist so lange real, solange Wirtschaftswachstum zur Lösung politischer Fragen notwendig ist und Klimaschutz als Wachstumshemmnis betrachtet wird.

1.2 Das moralische Dilemma

Ob eine präventive Klimapolitik implementiert werden soll, ist jedoch nicht nur eine Frage von Interessen- und Machtkonflikten. Es handelt sich scheinbar auch um einen moralischen Konflikt. Zunehmend wird in der öffentlichen Diskussion einer präventiven Klimapolitik die moralische Berechtigung abgestritten. Die Einbußen an Wirtschaftswachstum, hervorgerufen durch die Klimapolitik, stünden - so argumentieren viele Ökonomen und jüngst auch Renegaten der Umweltbewegung wie etwa Lomburg - in keinem Verhältnis zum Nutzen der Klimapolitik. Der Nutzen der Klimapolitik besteht im wesentlichen darin, Schäden des Klimasystems zu vermeiden. Mit welchen Schäden zu rechnen und wie sie ökonomisch zu bewerten sind, darüber streiten Naturwissenschaftler und Ökonomen erbittert. Angesichts dieser Situation sind Politiker vor ein moralisches Dilemma gestellt: Entweder sie betreiben Klimapolitik und schädigen damit die Weltwirtschaft, vor allem aber auch Länder wie China oder Indien, oder sie betreiben eine wirtschaftsfreundliche Energiepolitik und ruinieren damit möglicherweise das Klimasystem.

Solange politische Entscheidungsträger diesem Dilemma verhaftet bleiben, scheint sich die präventive Klimapolitik in einer ausweglosen Situation zu befinden. So verwundert es nicht, dass der Streit vor allem darum geht, ob denn der einsetzende Klimawandel tatsächlich so hohe Schäden verursache, wie angenommen. Da Naturwissenschaftler zugeben müssen, dass hier große Unsicherheiten bestehen, wird diese Unsicherheit gerne zum Vorwand genommen, klimapolitische Forderungen zurückzuweisen. Darüber hinaus wird immer wieder betont, dass die Anpassung an den einsetzenden Klimawandel effizienter sei, weil eine Anpassung lokal erfolgen könne und keine internationalen Vereinbarungen verlange, wie dies im Fall einer Vermeidungspolitik der Fall sei [Stehr, 2000, Stehr and Dowlatabadi, 2001].

1.3 Klimapolitik auf der Anklagebank

In der öffentlichen Debatte sitzt daher die präventive Klimapolitik auf der Anklagebank: Sie erscheint politisch als chancenlos, weil ihr der Vorwurf gemacht wird, die Gesellschaft müsse ihretwegen auf Wachstum verzichten um eines ungewissen Nutzens willen. Wer diesem moralischen Argument begegnen will, muss zeigen, dass die Schäden des Klimawandels die Konsumverzichte rechtfertigen. Wer dem politischen Einwand der Chancenlosigkeit begegnen will, muss zeigen, dass in wenigen Jahren machtvolle Akteure auftauchen werden, die an einer präventiven Klimapolitik interessiert sind.

Die Beurteilung von Vermeidungsoptionen hängt entscheidend von der Einschätzung des technischen Fortschritts ab. Wir legen hier Szenarien vor, die den technischen Fortschritt endogenisieren. Der dadurch entstehende Modellrahmen erlaubt einen neuen Blick auf die Vermeidungspolitik und damit auf den Umbau des Energiesystems. Wir werden zeigen, dass ein Umbau des Energiesystems unter bestimmten Voraussetzungen durchaus sinnvoll ist. Wir werden Bedingungen identifizieren, unter denen sich der Zielkonflikt zwischen Wachstum und Klimaschutz auflösen lässt. Sollte dies gelingen, ist ein weiterer Stein aus dem Weg geräumt, der bisher einer vernünftigen Klima- und Energiepolitik im Wege stand. Dies ist allerdings nur möglich, wenn Klimamodelle in makroökonomische Energiemodelle integriert werden. Dies ist bislang nur unzureichend geschehen [Imboden, 2000, Imboden and Jaeger, 1999]. Nur dann kann die Frage beantwortet werden, ob das klimapolitisch gebotene auch energiepolitisch machbar ist. Wir sind uns bewußt, dass wir hierzu keine abschließende Antworten geben können, aber wir stellen Szenarien vor, welche die energiepolitischen Möglichkeiten und Widerstände gleichermaßen identifizieren. Dabei werden kritische Parameter identifiziert und damit auch die kritischen Pfade. Keiner der hier diskutierten energiepolitischen Wege ist ohne Risiken. Auch der Übergang zu erneuerbaren Energien ist nicht ohne beträchtliche ökonomische und ökologische Risiken gangbar. Es wird darauf ankommen, solche Wege zu bestreiten, die irreversible Schäden vermeiden und dadurch die Chancen sozialen Lernens eröffnen.

1.4 Der Aufbau des Berichts

In diesem Bericht für den WBGU wollen wir langfristige Optionen und Szenarien einer nachhaltigen Energie- und Klimapolitik entwickeln, die dem Ziel eines nachhaltigen Wirtschaftswachstums ebenso Rechnung tragen wie einer präventiven Klimaschutzpolitik. Wir werden einerseits die langfristigen Optionen für eine Vermeidungspolitik identifizieren und bewerten; zum anderen werden wir Szenarienrechnungen vorlegen. Unter einem Szenario sei hier ein möglicher Zukunftspfad verstanden. Dieser Zukunftspfad sollte gangbar sein, d.h. es sollte die logische Schrittfolge erkennbar sein. Szenarien lassen sich auch in erzählender Form darstellen. Werden Szenarien mit Hilfe von Computermodellen berechnet, so können damit nicht nur die Implikationen bestimmter Annahmen erfasst, sondern auch bottlenecks identifiziert werden. Szenarienrechnungen sind gegenüber Szenarien enger in ihrem Aussagebereich, aber innerhalb dieses Aussagebereichs präziser. Szenarien sind in ihrem Aussagebereich weiter, dafür aber weniger präzise als Szenarienrechnungen. Ein Integrated Assessment wird sich beider Methoden bedienen.

- In Teil 2 wird die Problemstellung umrissen.
- In Teil 3 beschreiben wir die langfristigen Handlungsoptionen und erläutern, welche wir in unseren Szenarienrechnungen näher beleuchten wollen.
- In Teil 4 rechnen wir vier grundlegende Szenarien durch.
- In Teil 5 skizzieren wir unsere Überlegungen für eine Klimapolitik in der Post-Kyoto Phase vor. Wir glauben, dass sich aus dem Zusammenspiel von steigenden Skalenerträgen und Erwartungen interessante Perspektiven für die Klimapolitik ergeben.
- In Teil 6 hoffen wir zu zeigen, dass das Konzept der naturräumlichen und sozioökonomischen Resilienz ein geeigneter Zugang ist, um den Umbau des Energiesystems in eine größere gesellschaftspolitische Debatte einzubetten. Die ordnungspolitischen Konsequenzen unserer Überlegungen werden wir ebenfalls darstellen.

Kapitel 2

Problemstellung

In Kapitel 2 setzen wir uns mit den Argumenten der Vermeidungs-Skeptiker auseinander. Die Diskussion um die Kosten und den Nutzen der Vermeidung ist innerhalb des IPCC geführt worden und auch zu einem vorläufigen Abschluß gekommen. Die Arbeitsgruppe III hat im dritten Sachstandsbericht überzeugend gezeigt, dass der technische Fortschritt die entscheidende Größe ist in der Beurteilung der Vermeidungspolitik. Die Annahmen über den technischen Fortschritt entscheiden darüber, wann und wo die Treibhausgasemissionen vermieden werden sollen. Aus diesem Grund kommt der IPCC auch zu dem Ergebnis, dass die Endogenisierung des technischen Fortschritts zu den entscheidenden Herausforderungen der Forschung gehört. Dabei geht es im wesentlichen um zwei Fragestellungen: Einmal geht es darum, wie der technische Fortschritt das „timing“ der Emissionen beeinflusst; zum anderen geht es darum, wie der technische Fortschritt die optimale räumliche Verteilung der Emissionsverminderung beeinflusst. Die Wichtigkeit dieser beiden Effekte wird verdeutlicht durch den populären Slogan der Vermeidungsskeptiker: „Not Yet, Not Here!“. Es sollten nicht jetzt und auch nicht in den Industriestaaten Emissionen reduziert werden, weil dies morgen und in Entwicklungsländern viel kostengünstiger geschehen könnte. Die Option des „Not Yet, Not Here“ ist jedoch nur unter bestimmten Annahmen über den technischen Fortschritt vernünftig. Beide Fragen können sowohl im Rahmen einer Kosten-Nutzen als auch im Rahmen einer Kosten-Effektivitätsanalyse untersucht werden. Wir werden die Anwendung beider Verfahren auf das Klimaproblem umreißen, um dann zu begründen, warum wir uns gegen die Kosten-Nutzen-Analyse entschieden haben. Danach werden wir zeigen, welche Rolle der technische Fortschritt in der Kosten-Effektivitäts-Analyse und im TWA

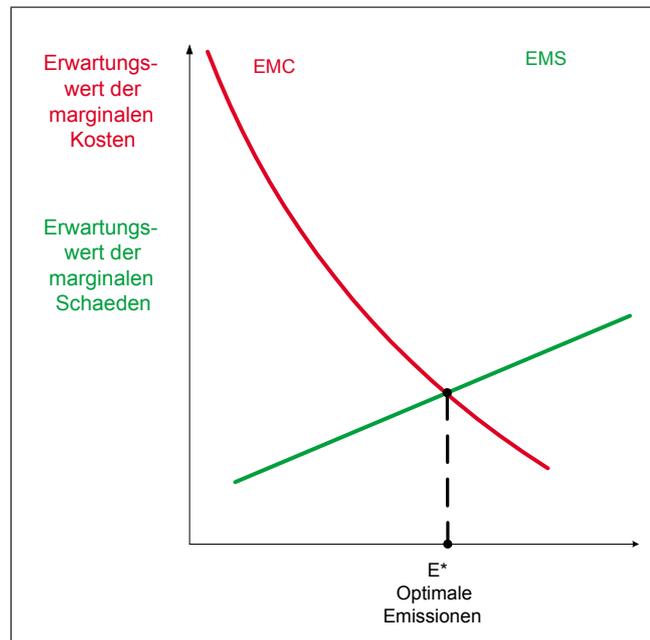


Abbildung 2.1: Idealtypische Kosten-Nutzen Analyse: Die marginalen Erwartungskosten der Vermeidung verlaufen relativ steil, die der marginalen Erwartungsschäden relativ flach.

spielt. In einem abschließenden Teil geht es um die Problematik des technischen Fortschritts in Modellen des Integrated Assessment.

2.1 Die Problematik der Kosten-Nutzen-Analyse

Die Bewertung klimapolitischer Optionen hängt entscheidend von den Erwartungskosten der Vermeidung und den Erwartungsschäden der Emissionen ab: Je steiler die Kurve der marginalen Kosten verläuft und je flacher die Kurve der marginalen Erwartungsschäden, um so geringer wird das Niveau der Emissionsvermeidung sein.

Wie Abbildung 2.1 zeigt, ergibt sich daraus ein relativ hohes Niveau der optimalen Emissionen. Diese Vorstellung impliziert zweierlei. Einmal, dass die Wirtschaft gegenüber klimapolitischen Eingriffen relativ verwundbar ist. Auf der anderen Seite wird das natürliche System gegenüber einem Anstieg der Emissionen als relativ robust betrachtet. So sind z.B. Ökonomen wie Nordhaus and Boyer [2000] der Auffassung, die Schäden des Klimawandels lägen weit in der Zukunft, die Kosten der

Vermeidung von CO₂ jedoch in der Gegenwart. Dieses Argument wird zusätzlich dadurch gestützt, dass die Schäden wegen der Trägheit des Klimasystems erst mit einer Zeitverzögerung von 50 Jahren eintreten, während die Kosten der Vermeidung von Emissionen sofort anfallen. Wegen der Diskontierung fallen daher die Schäden weniger ins Gewicht als die Vermeidungskosten, die ja in näherer Zukunft anfallen. In dieser Logik ist es durchaus rational, erst in der Zukunft die Emissionen zu vermindern.

Viele Klimawissenschaftler sind jedoch der Auffassung, dass der Zusammenhang zwischen Temperaturentwicklung und Schaden ungewiss sei und im Extremfall zu katastrophalen Ereignissen führen könne. In diesem Fall wird die Kurve der Erwartungsschäden einen Knick aufweisen, weil der Erwartungsschaden unendlich werden kann, selbst wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit sehr gering ist (siehe Abbildung 2.2): Der Zusammenbruch des Nordatlantikstroms, die unvermittelte Veränderung der Monsundynamik, die zunehmende Wasserknappheit in den Wüstengürteln sind solche sprunghafte und unwiderrufliche Ereignisse. Da beim derzeitigen Stand des Wissens die Abschätzung dieser Schäden unmöglich ist, ist es vernünftig zu fragen, was vernünftige Grenzen der Emissionsentwicklung sein könnten. Die Kosten-Nutzen-Analyse ist ein wenig brauchbares Instrument, wenn eine Schadensfunktion Sprünge aufweist, so dass der Erwartungsschaden gegen unendlich konvergiert. Es ist in der Umweltökonomik durchaus anerkannt, dass unter diesen Voraussetzungen die Kosten-Effektivitäts-Analyse der angemessene Analyserahmen ist.

2.2 Die Kosten-Effektivitäts-Analyse

Die Kosten-Effektivitätsanalyse beantwortet die Frage, wie ein bestimmtes, etwa politisch gesetztes Umweltziel kostenminimal erreicht werden kann. Der WBGU (Wissenschaftlicher Beirat für Globale Umweltveränderungen) hat versucht, ein Sicherheitsfenster zu formulieren: Innerhalb dieses Fensters sei die Gefahr einer dauerhaften und schwerwiegenden Störung des Erd-Systems relativ gering und daher tolerierbar. Der WBGU wählte eine Temperaturerhöhung von zusätzlich 2.0 °C und ein Anstieg von höchstens 0.2 °C pro Jahrzehnt zur Spezifizierung eines solchen Sicherheitsfensters. Mit der Festlegung eines solchen Temperaturfensters wird implizit auch die Arbeitsteilung zwischen Vermeidung und Anpassung festgelegt. Bei einer Erhöhung der Globalen Temperatur um mehr als 2.0 °C werden den kommenden

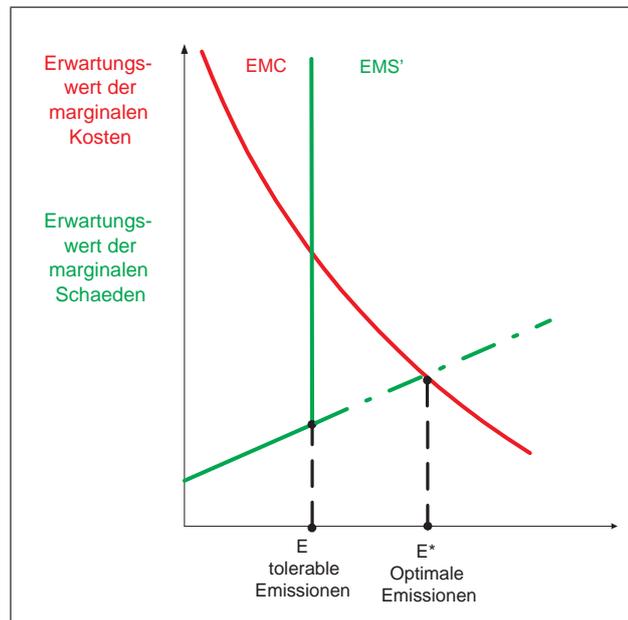


Abbildung 2.2: Die Erwartungsschäden können gegen Unendlich konvergieren.

Generationen erhebliche Anpassungsleistungen auferlegt, denn immerhin wird eine Globale Mitteltemperatur zugelassen, die während des gesamten Holozäns nicht beobachtet wurde.

Wie kann dieses Temperaturziel nun kostenminimal erreicht werden? Das Kostenminimum kann im Hinblick auf die zeitliche und die räumliche Verteilung von Emissionsreduktionen bestimmt werden. Wir behandeln hier nur den zeitlichen Aspekt, der räumliche Aspekt ist völlig analog. Wie Abbildung 2.3 zeigt, ergibt sich eine optimale Aufteilung der Emissionen zwischen heute und morgen aus dem Schnittpunkt der marginalen Vermeidungskosten. Ganz analog müsste also eine Region um so mehr Treibhausgase vermeiden, je flacher die Grenzkostenkurve verläuft. Nun stellt sich die entscheidende Frage, wie der technische Fortschritt die zeitliche (und räumliche) Dynamik der Emissionen verändert.

Abbildung 2.3 zeigt, wie technischer Fortschritt, der wie „Manna vom Himmel“ fällt, die Verschiebung der Emissionen in die Zukunft optimal erscheinen lässt: Auf der Abszisse wird ein fixes Emissionskontingent auf heute und morgen verteilt. Wenn gar nicht emittiert wird, sind die marginalen Vermeidungskosten maximal, d.h. die Einsparung ist am schwierigsten. Ein kosteneffektives Optimum wird am

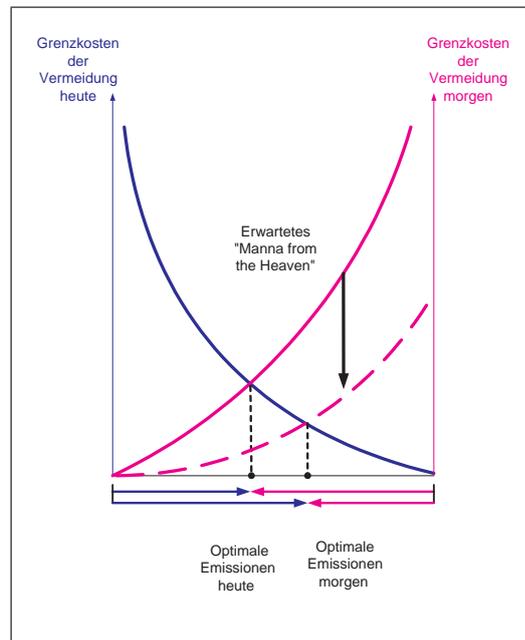


Abbildung 2.3: „Manna from the Heaven“ verschiebt die Last der Emissionsreduktion in die Zukunft

Schnittpunkt der Kurven erreicht. Falls Investoren von einem exogenen technischen Fortschritt ausgehen, der ohne ihr Zutun die marginalen Vermeidungskosten für „morgen“ reduziert (gestrichelte lila Kurve), so verschiebt sich der Schnittpunkt nach rechts und es muss „heute“ noch mehr emittiert werden. Die Modellierung des technischen Fortschritts als exogenem Parameter führt zu der Aussage: Die Emissionsvermeidung kann, darf und sollte noch hinausgeschoben werden!

Wer heute zuviel CO₂ reduzieren will, verschwendet also knappe Mittel, weil künftige Generationen ihre Emissionen billiger reduzieren können. Die Modelle errechnen dieses Ergebnisse, weil angenommen wird, der technische Fortschritt regne auf die Menschheit herab wie einst Manna auf das Volk Israel in der Wüste. Eine Reduktion der Treibhausgase vor dem Jahr 2040 ist nach diesen Modellrechnungen ökonomisch „unvernünftig“, da der technische Fortschritt die Vermeidungskosten in der Zukunft drastisch reduzieren wird [IPCC Working Group III, 2001].

Die Annahme eines exogenen technischen Fortschritts ist jedoch vor allem aus ökonomischer Perspektive unplausibel. Der technische Fortschritt ist eine Aktivität, die durch ökonomische Determinanten mitbestimmt wird. Wenn auch keine allge-

mein akzeptierte Theorie des technischen Fortschrittes existiert, so waren und sind Ökonomen der Auffassung, dass auftretende Knappheiten Innovationen hervorrufen. Die entstehende Knappheit von Boden durch das Bevölkerungswachstum hat bodenerhöhenden Fortschritt induziert; die steigenden Rohstoffpreise haben nicht nur zu Substitutionsprozessen geführt, sondern auch Investitionen in die Exploration rentabel gemacht. Diese auf Hicks [1963] zurückgehende Idee eines induzierten technischen Fortschrittes wird in dem hier vorgestellten Modell MIND eine entscheidende Rolle spielen. In den letzten Jahren hat diese Idee sowohl konzeptionell [Ruttan, 2000] als auch in der Umwelt- und Klimaökonomik [Goulder and Mathai, 2000] eine wichtige Weiterentwicklung erfahren. Letztlich steht hinter der Idee eines endogenisierten Fortschrittes der Versuch, ein Argument zu formalisieren, das vor einigen Jahren von Porter and van der Linde [1995] in die Diskussion eingebracht wurde: Ist es möglich, dass durch Festlegung von Umweltstandards ein Innovationspotential freigesetzt wird, so dass sich Umweltziele mit nur geringen Wohlfahrtsverlusten, vielleicht sogar mit Wohlfahrtsgewinnen erreichen lassen? Die ökonomische Profession hat sich mit der Formalisierung dieses Argumentes schwer getan. Dies wird verständlich, wenn man sich vor Augen führt, warum Ökonomen die Kosten-Nutzen-Analyse in der Regel einer Kosten-Effektivitäts-Analyse vorziehen.

Der Grund hierfür lässt sich an Abbildung 2.4 verdeutlichen. In der Abbildung bezeichnet der Schnittpunkt zwischen der Kurve der marginalen Erwartungsschäden und der marginalen Vermeidungskosten das optimale Niveau der Emissionen. Legt man nun eine Grenze für die Emissionen fest, so ergibt sich gemessen am optimalen Niveau ein Wohlfahrtsverlust in der Höhe des schraffierten Dreiecks. Dieses Ergebnis ist nicht überraschend, da die Einführung von zusätzlichen Restriktionen in ein mathematisches Optimierungsproblem immer als Wohlfahrtsverluste zu Buche schlagen, sofern die Restriktionen bindend sind und damit einen positiven Schattenpreis haben.

Die Einführung dieser zusätzlichen Restriktion lässt sich aber durchaus präferenztheoretisch interpretieren. Hat die Funktion der marginalen Erwartungsschäden eine Steigung von unendlich, so heißt dies nichts anderes, als dass ein darüber hinausgehendes Niveau von Schäden nicht mehr gegen die Vermeidungskosten abgewogen werden darf. Das Verbot der Güterabwägung ist in der philosophischen Ethik, sofern sie in der Tradition von Kant steht, ein akzeptiertes Argument. Dieses Verbot der Güterabwägung kann im utilitaristischen Bezugsrahmen als lexikalische Präfe-

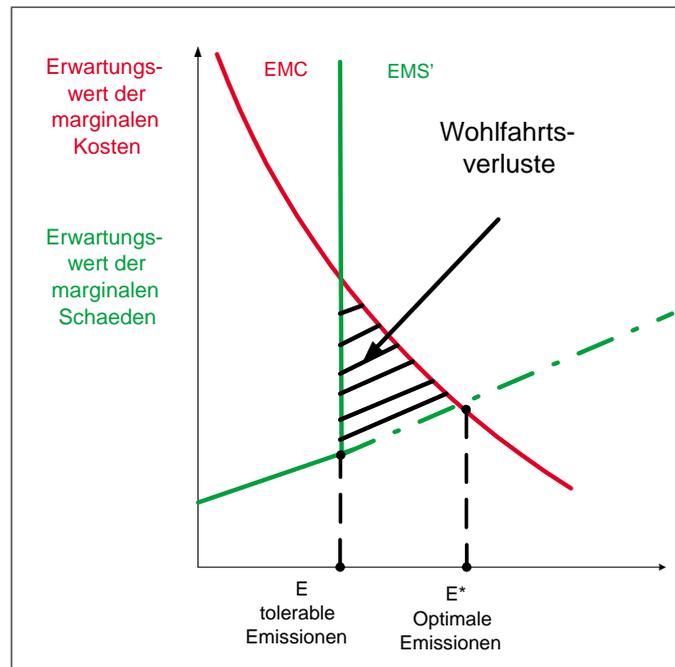


Abbildung 2.4: Vergleich von Kosten-Effektivitäts-Analyse und Kosten-Nutzen Analyse

renz verstanden werden. Im Rahmen des Utilitarismus werden jedoch Einwände gegen lexikalische Präferenzen vorgebracht - vor allem weil sie mit hohen Wohlfahrtsverlusten verbunden sein können, sofern der Kostenbegriff dieser Kritik noch akzeptiert werden kann. Man kann diesen Einwand mit dem Hinweis abtun, lexikalische Präferenzen seien eben Ausdruck unbedingter Normen. Dem ist durchaus zuzustimmen, wenn etwa elementare Lebensrechte kommender Generationen gegen Luxuskonsum heutiger Generationen aufgerechnet werden sollen. Hingegen lässt sich durchaus argumentieren, dass eine Güterabwägung zwischen moralischen Normen oft unausweichlich ist - etwa wenn es darum geht, die Lebenschancen der heutigen Generationen gegen die der Zukunft abzuwägen. Ist man vor Zielkonflikte zwischen Gütern gleicher Rangordnung gestellt, ist der Hinweis auf lexikalische Präferenzen zunächst wenig hilfreich, weil begründet werden müsste, warum die Alternative A (z.B. wirtschaftliche Entwicklung) unbedingt gegenüber der Alternative B (z.B. Klimaschutz) vorzuziehen sei. Es soll hier nicht bestritten werden, dass sich lexikalische Präferenzen begründen lassen. Wir stellen hier nicht die Frage, ob und wie lexika-

liche Präferenzen begründet werden können; uns interessiert, wie der Zielkonflikt zwischen Gütern gleicher Rangordnung vermieden werden kann. Gibt es also Wege, Zielkonflikte zu vermeiden?

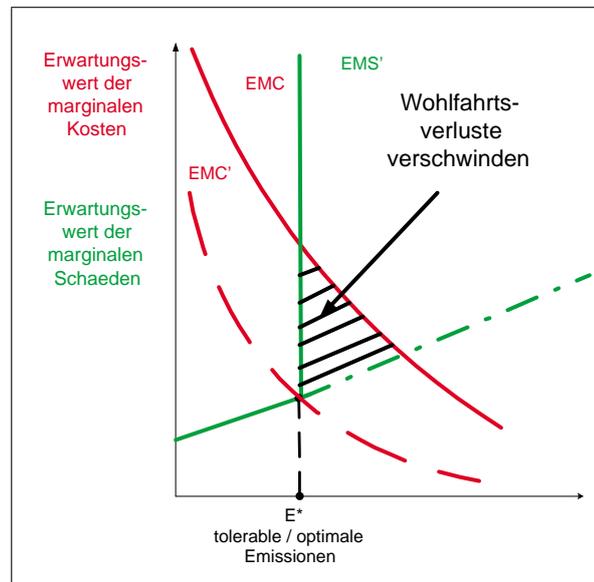


Abbildung 2.5: Technischer Fortschritt vermindert Wohlfahrtsverluste

In der Abbildung 2.5 zeigt sich, dass der Wohlfahrtsverlust vermieden werden können, wenn die Vermeidungskosten durch technischen Fortschritt gesenkt werden können. Zwar sind auch Innovationen nicht kostenlos, da sie Investitionen voraussetzen. Ob daher die Kosten der Investitionen die Wohlfahrtsgewinne aufwiegen, kann auf der Basis der Abbildung 2.5 nicht entschieden werden; sie dient nur der Veranschaulichung und ist kein Beweis. Wir werden in Abschnitt 4 zeigen, dass sich unsere Intuition, bei der wir Porter und van der Linde folgen, bestätigt: Innovationen können die Kosten der moralischen Norm „Klimaschutz“ drastisch senken.

Wir verstehen Ökonomie nicht nur als die Kunst, unter knappen Bedingungen zu wirtschaften, sondern auch als die Kunst, die Kosten moralischen Handelns zu senken. Wir glauben nicht, dass wir wählen können, ob wir unter Knappheit leben wollen. Wir glauben allerdings, dass wir wählen können, mit welchen Knappheiten wir leben sollen. Wir werden im Rahmen von MIND zeigen, unter welchen Bedingungen sich die Kosten des Klimaschutzes senken lassen.

2.3 Der Leitplankenansatz

Das Leitmotiv, die Kosten von Leitplanken zu senken, soll hier auch im Leitplankenansatz verfolgt werden. Dieser Ansatz geht von normativ zu setzenden Grenzen (Leitplanken) für die Belastung durch Klimaschäden sowie durch Klimaschutzmaßnahmen aus und bestimmt den mit diesen Restriktionen verträglichen klimapolitischen Spielraum. Wichtigste Vertreter sind die sogenannte Safe Landing Analysis sowie der Tolerable Windows Approach, der 1995 vom Wissenschaftlichen Beirat Globale Umweltveränderungen vorgeschlagen wurde.

Die zwei wichtigsten Unterschiede zwischen TWA und Politikoptimierungsanalysen können wie folgt charakterisiert werden: Der TWA bietet keine eindeutige Klimaschutzstrategie als optimale Lösung an, sondern versucht, das Bündel der mit den Leitplanken verträglichen Strategien zu bestimmen. Ein Beispiel für die vereinfachte Darstellung solcher Bündel sind Emissionskorridore. Sie stellen die Menge aller Emissionspfade in der Zeit dar, die mit den Leitplanken verträglich sind. Die mengenwertige Darstellung betont den mit den Leitplanken verknüpften Handlungsspielraum für den Entscheidungsträger. Sie liefert allerdings keine Bewertung von möglichen Strategien innerhalb des Spielraums. In diesem Sinne führt der TWA zu einer Unterbestimmung von Politikoptionen, während die Politikoptimierungsansätze im Klimaschutzbereich zu einer Überbestimmung von Politikoptionen gezwungen sind.

Die im Rahmen des TWA zu setzenden Leitplanken können für beliebige Zustandsvariablen bzw. beliebige von den Zustandsvariablen abhängige Bewertungsfunktionen gesetzt werden. Durch den K.O.-Charakter der Leitplanken entfällt die normativ unauflösbare Frage der Aggregation über verschiedene Bewertungskategorien, die bei der Bestimmung eines skalaren Nutzenmaßes zu beantworten ist. Eine Klimaschutzstrategie ist genau dann zulässig, wenn sie alle Leitplanken in allen Bewertungskategorien simultan erfüllt. Diese Auflösung des Aggregationsproblem verlagert allerdings die Kontroverse auf die Bestimmung von K.O.-Kriterien in den einzelnen Bewertungskategorien.

Eine praktische Anwendung des TWA erfordert eine geeignete Interpretation der Leitplanken. Im allgemeinen ist es nicht möglich, eine scharfe Grenze zwischen einem intolerablen und tolerablen Bereich möglicher Zukünfte zu ziehen. Stattdessen existiert eine Grauzone zwischen einer eindeutigen Tolerabilitätsgrenze, die tolerable

Zukünfte einschließt, und einer eindeutigen Intolerabilitätsgrenze, die intolerable Zukünfte ausschließt. Methodische und konzeptionelle Gründe legen es nahe, die Leitplanken im TWA als Intolerabilitätsgrenzen zu interpretieren. Dadurch wird der Fokus auf die von Leitplanken ausgeschlossenen Politikoptionen, nicht auf die mit den Leitplanken verträglichen Politikstrategien gelegt - ein für die Politikberatung sehr wichtiger Aspekt.

Die konzeptionelle Motivation für eine solche Interpretation rührt daher, dass eine vollständige Spezifizierung des tolerablen Zukunftsbereich in der Klimafrage unmöglich erscheint. Dagegen reicht eine unvollständige Spezifizierung des intolerablen Zukunftsbereichs bereits aus, um wichtige Informationen über Politikoptionen zu bekommen. Optionen, die durch die gegebene Leitplankensetzung als intolerabel auszuschliessen sind, werden auch bei der Hinzunahme weiterer Leitplanken unzulässig bleiben.

Die methodische Motivation für die Interpretation der Leitplanken als Intolerabilitätsgrenzen gründet sich auf die Tatsache, dass eine vollständige Darstellung des Bündels der zulässigen Klimaschutzstrategien beim gegenwärtigen Stand der Forschung nicht möglich ist. Stattdessen können nur zulässige Mengen wie z.B. Emissionskorridore dargestellt werden, die keine Information über die innere Struktur des Pfadbündels mehr enthalten, d.h. welche zwei Punkte durch einen Pfad verknüpft sind. Daher ist nicht jeder erdenkliche Pfad innerhalb des Korridors mit den Leitplanken verträglich. Es lässt sich lediglich sagen, dass jeder Pfad, der den Korridor verlässt, mit den Leitplanken nicht verträglich ist.

2.4 Die Modellierung des technischen Fortschritts

Wir werden den Leitplankenansatz und Kosten-Effektivitätsanalyse parallel verwenden, allerdings immer mit dem Ziel, durch eine vernünftige Repräsentation des technischen Fortschritts neues Licht auf bestehende Handlungsspielräume zu werfen. In den letzten 15 Jahren gab es eine Reihe von beachtlichen Versuchen, den technischen Fortschritt zu endogenisieren. So haben Goulder and Mathai [2000] gezeigt, wie der optimale zeitliche Verlauf der Emissionen durch den technischen Fortschritt beeinflusst wird. Wird der technische Fortschritt hauptsächlich durch R&D Inve-

stitutionen getrieben, so lohnt es sich trotz endogenem technischem Fortschritt die Emissionsvermeidung in die Zukunft zu verschieben, da der technische Fortschritt die Kosten der Vermeidung in der Zukunft senkt. Wird jedoch der technische Fortschritt hauptsächlich durch learning by doing vorangetrieben, so zeigen sich im wesentlichen zwei Effekte: Einerseits werden auch die Kosten der Vermeidung in der Zukunft gesenkt, andererseits bedarf es dazu vermehrter Emissionsverminderungen in der Gegenwart, um überhaupt in den Genuß einer erhöhten Produktivität in der Zukunft zu kommen. Welche dieser beiden Effekte dominiert, hängt von der genauen Spezifikation des Modells ab [IPCC Working Group III, 2001, Kypreos and Barreto, 2000, Messner, 1995, Kypreos et al., 2000, Chakravorty et al., 1997]

Im Rahmen der endogenen Wachstumstheorie [Aghion and Howitt, 1997] wurde in den letzten Jahren der Versuch unternommen, ökonomische und institutionelle Determinanten des technischen Fortschritts zu identifizieren. Dieser vielversprechende Grundansatz wurde bislang nur sehr zögerlich in der klimapolitischen Diskussion angewandt. Der Vorteil endogener Wachstumsmodelle in der Klimapolitik besteht aber gerade darin, dass sie für lange Zeithorizonte geeignet sind. Berechenbare Allgemeine Gleichgewichtsmodelle, aber auch Energiesystemmodelle sind hierzu wenig geeignet, da sie nur einen Zeithorizont von 10-20 Jahren im Auge haben. Die Langfristsperspektive endogener Wachstumsmodelle erlaubt einen Vergleich mit den stilisierten Fakten des Wachstums. Den endogenen Wachstumsmodellen gelingt es durchaus, einige wichtige stilisierten Fakten des Wachstumsprozesses zu erklären.

Allerdings wurde die Rolle von Energie in endogenen Wachstumsmodellen kaum untersucht; allenfalls wurden erschöpfbare Ressourcen in die Analyse miteinbezogen [Aghion and Howitt, 1997]. Mit diesen Modellen lassen sich die stilisierten Fakten der Ressourcennutzung ebensowenig reproduzieren wie die Emissionsverläufe. Trotz der Einführung eines stochastisch induzierten technischen Fortschritts in einer makroökonomischen Produktionsfunktion, reproduzieren diese Modelle nur den klassischen Hotelling- bzw. Solow Stiglitz Pfad der Ressourcennutzung, wonach die Ressourcenextraktion im Zeitablauf sinkt und der Schattenpreis der Ressource mit der Rate des Zinssatzes wächst. Dieser Hotelling-Pfad ist aber mit den stilisierten Fakten der Energienutzung nicht vereinbar. Denn die Energienutzung ist während der Phase der Industrialisierung kontinuierlich gestiegen, während der Energiepreis in säkularer Perspektive keinem Trend folgt. Einen solchen Verlauf des Energieverbrauchs und der Emissionen erhält man, wenn man technischen Fortschritt in den

Explorations- und Extraktionssektor einführt. Der klassische Hotelling-Pfad widerspricht aber nicht nur den historischen Daten, sondern auch den SRES-Szenarien [Nakićenović and Swart, 2000], die eine benchmark in der Szenarienentwicklung darstellen. Auch hier werden die Emissionen zunächst noch steigen, um dann abgebremst zu werden.

Ebenfalls wenig geklärt ist die Rolle der erneuerbaren Energien: In endogenen Wachstumsmodellen spielen sie bislang keine Rolle. Ob und in welchen Zeiträumen erneuerbare Energie die fossilen Energiequellen ablösen werden, kann nur verstanden werden, wenn man sich über die Dynamik des technischen Fortschritts in diesen Sektoren Rechenschaft ablegt und sie mit der Dynamik in anderen Sektoren vergleicht. So ist es durchaus denkbar, dass unter business-as-usual Annahmen die erneuerbaren Energien gegenüber den fossilen Energieträgern im nächsten Jahrhundert nicht konkurrenzfähig werden können, die Produktivitätsgewinne bei den erneuerbaren Energie zu gering und bei den fossilen Ressourcen zu hoch sind. Eine aktive Klimaschutzpolitik würde unter diesen Voraussetzungen relativ hohe Wohlfahrtsverluste hervorrufen.

Erst diese sektorale Auflösung erlaubt es, die Dynamik des Energieverbrauchs bzw. der Emissionen in kapitalistischen Wirtschaften zu beschreiben. Dabei ist es wichtig zu verstehen, dass sich technischer Fortschritt in den verschiedenen Sektoren durchaus mit unterschiedlicher Geschwindigkeit entwickeln kann und muss. Die Determinanten dieser Dynamik formal zu beschreiben und zu modellieren ist dabei eine wichtige Herausforderung an das Integrated Assessment. Wir werden in Teil 4 darüber berichten, wie wir uns dieser Herausforderung gestellt haben.

Kapitel 3

Der Umbau des Energiesystems als langfristige Klimaschutzoption

In diesem Kapitel sollen zwei grundlegende Themen behandelt werden. Erstens wird die Rolle der anderen, Nicht-CO₂-Treibhausgase (ATHG) behandelt. Es wird sich zeigen, dass unter realistischen Annahmen das ursprüngliche Temperaturfenster des WBGU nicht mehr erreichbar ist. Zweitens werden wir die langfristigen Optionen für eine Vermeidungspolitik diskutieren. Es zeigt sich, dass die Dynamik der ATHG hier eine besondere Problematik darstellt, deren Behandlung in dem hier vorgestellten Analyserahmen nur sehr eingeschränkt möglich ist. Da Methan das wichtigste ATHG darstellt, wäre es nötig, die Dynamik der Landnutzung und der Landwirtschaft zu erfassen. Dies erfordert regional aufgelöste Modelle, die wir in den nächsten Monaten am PIK entwickeln werden.

Für eine aktive Klimaschutzpolitik stehen fünf grundlegende Optionen zur Verfügung; vor diesem Hintergrund ist keineswegs selbstverständlich, warum der Umbau des Energiesystems die zentrale Option sein soll. In Teil 3.1 werden uns mit der Problematik der anderen Treibhausgase auseinandersetzen; es wird sich zeigen, dass bei Einbeziehung dieser Treibhausgase das ursprüngliche WBGU-Fenster nicht mehr erreichbar ist. In Teil 3.2 werden die fünf Optionen hinsichtlich einer Vermeidung von CO₂ diskutiert. In Abschnitt 3.3 beschäftigen wir uns mit den Randbedingungen des Energiesystems, die zur Beurteilung energiepolitischer Optionen wesentlich sind.

3.1 Der Einfluss von CO₂ im Vergleich zu anderen Treibhausgasen

Eine Transformation des Energiesystems von fossilen zu erneuerbaren Quellen führt zu einer Reduktion von CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Ressourcen und trägt auf diese Weise zum Klimaschutz bei. Ob jedoch die resultierende CO₂-Reduktion einen ausreichenden Klimaschutz gewährleisten kann, hängt nicht nur von der Durchsetzungskraft der erneuerbaren Energien, sondern auch von den Emissionen der anderen Treibhausgase (ATHG) wie z.B. Methan und Distickstoffoxid ab. Wie die folgende Aufstellung zusammenfasst, werden die Emissionen der ATHG nur sehr bedingt von der Energiewirtschaft hervorgerufen.

- **Methan (CH₄):** CH₄ ist das zweitwichtigste Treibhausgas nach CO₂. Die Quellen der CH₄-Emissionen sind weitgehend bekannt, ihr relativer Anteil an den Gesamtemissionen aber noch sehr unsicher. Ca. 35-40% des heutigen CH₄-Ausstosses stammt aus natürlichen Quellen (vor allem aus Feuchtgebieten). Der anthropogene Beitrag von ca. 300-400 MtC pro Jahr spaltet sich auf in Wiederkäuer (ca. 20-30% des anthropogenen Beitrags), Deponien und Abfallwirtschaft (ca. 10-20%), Reisanbau (ca. 10-30%), Verbrennen von Biomasse (ca. 10-15%) und die Nutzung fossiler Brennstoffe (ca. 20-30%) [Prather and Ehhalt, 2001, Table 4.2, pg. 250]. Somit werden maximal ein Drittel der anthropogenen CH₄-Emissionen von der Energiewirtschaft verursacht. Sie fallen vor allem in der Kohle- und Gaswirtschaft an. Der Großteil der Emissionen der Gasindustrie entsteht beim Transport des Erdgases durch Lecks in Kompressoren und Pipelines. In der Kohleindustrie wird das mit der Kohle eingelagerte Methan bei der Förderung freigesetzt. Ähnliches gilt für die Ölindustrie, wo noch häufig das bei der Ölförderung als „Abfallprodukt“ gewonnene Erdgas in die Atmosphäre verklappt wird.

Ungefähr die Hälfte der energiebedingten Methan-Emissionen lassen sich zu sehr niedrigen oder sogar negativen Kosten für die fossile Energiewirtschaft vermeiden [Moore et al., 1998]. Daher ist davon auszugehen, dass die zukünftige Entwicklung der anthropogenen Methan-Emissionen nur geringfügig von einer Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Quellen gegenüber einem fossilen Referenzszenario beeinflusst wird.

- **Distickstoffoxid (N_2O):** Schätzungsweise ein Drittel der gesamten N_2O -Emissionen von 17 ± 10 MtN pro Jahr stammen aus anthropogenen Quellen. Doch auch der N_2O -Ausstoß natürlicher Ökosysteme, die die größte N_2O -Quelle darstellen, ist vermutlich durch anthropogene Eingriffe wie den Mehreinsatz von Düngemitteln beeinflusst. Die Anteile der verschiedenen menschlicher Aktivitäten an den anthropogenen N_2O -Emissionen lassen sich nur mit großer Unsicherheit quantifizieren [Prather and Ehhalt, 2001]. Der Löwenanteil (ca. 70-80%) wird von Landwirtschaft und Tierhaltung verursacht. Ca. 10-20% stammen aus industriellen Prozessen (Nylonherstellung, Nitritsäureproduktion), dem Verkehrsbereich und Gas- und Kohlekraftwerken. Es lässt sich also feststellen, dass der Beitrag der Energiewirtschaft zu den N_2O -Emissionen gering ist.
- **Synthetische Treibhausgase:** Die synthetischen Treibhausgase haben keine oder nur sehr kleine natürlichen Quellen und resultieren fast vollständig aus industriellen Prozessen. Sie bestehen aus den im Kyoto-Protokoll erfassten teilhalogenierten oder perfluorierten Fluorkohlenwasserstoffen (H-FKW/P-FKW) und Schwefelhexafluorid (SF_6), sowie den unter dem Montreal-Protokoll zum Schutz der Ozonsphäre zu reduzierenden Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW/H-FCKW). Die H-FKW dienen u.a. als Substitute für die FCKW, und werden z.B. in Kühlmitteln benutzt. Die Energiewirtschaft produziert keine synthetischen Treibhausgase.
- **Indirekte Treibhausgase:** Indirekte Treibhausgase absorbieren die terrestrische Infrarotstrahlung nur im vernachlässigbaren Maße, tragen aber durch ihren Einfluss auf die Atmosphärenchemie zur Bildung direkter Treibhausgase bei. Ihre wichtigsten Vertreter sind Kohlenmonoxid (CO), Nitrogenoxid (NO_x) und volatile organische Verbindungen (VOC). Über chemische und photochemische Prozesse beeinflussen sie die atmosphärische Methanlast und tragen vor allem zur Bildung von troposphärischem Ozon (O_3) bei. Troposphärisches Ozon wird nach Kohlendioxid und Methan als das dritt wichtigste Treibhausgas eingeschätzt [Prather and Ehhalt, 2001]. NO_x und VOC spielen zudem auch eine Rolle als Vorläufersubstanzen für die Aerosolbildung in der Atmosphäre. Im Gegensatz zu Methan, Distickstoffoxid und den synthetischen Treibhausgasen sind die indirekten Treibhausgase sehr kurzlebig und liegen daher in

regional und saisonal sehr unterschiedlichen Konzentrationen vor. Es ist daher sehr schwierig, ihre Gesamtemissionen und deren indirekte Treibhauswirkung zu quantifizieren.

80%-90% des heute emittierten CO stammt aus anthropogenen Quellen. Diese ca. 600 MtC pro Jahr resultieren zu ähnlich großen Teilen aus Abholzung und Brandrodung auf der einen Seite und Verbrennung von fossilen Brennstoffen auf der anderen Seite. Für letzteren Beitrag spielt der Verkehrssektor eine wichtige Rolle. So wird vermutet, dass die Einführung von Katalysatoren in Kraftfahrzeugen für die in den neunziger Jahren beobachtete leichte Absenkung der CO-Emissionen verantwortlich ist. VOC werden vor allem in der Biosphäre freigesetzt, wobei der Mensch durch seine Landnutzung, ähnlich wie bei Distickstoffoxid, einen indirekten Beitrag hat. Direkte anthropogene Einträge von VOC in die Atmosphäre stammen vor allem aus Kraftfahrzeugen und der Verbrennung von Biomasse. NO_x wird als Stickstoffoxid (NO) emittiert. Dabei dominieren die anthropogenen Quellen mit 20-40 MtN pro Jahr. Der Großteil der anthropogenen NO-Emissionen kommt aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe, davon 40% auf dem Verkehrssektor. Die NO-Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse sind ca. 4-5 mal niedriger.

Abschließend lässt sich sagen, dass Landnutzung und Verbrennung fossiler Brennstoffe einen ähnlich großen Anteil an der Emission von indirekten Treibhausgasen haben. Dabei stammt der Beitrag der fossilen Brennstoffe zu einem wesentlichen Teil aus dem Verkehrs- und Transportsektor. Durch die regionale und saisonale Variation der Konzentrationen, die sich auch in der Verteilung des klimawirksamen troposphärischen Ozons niederschlagen, ist die Treibhauswirkung von CO, NO_x und VOC nur sehr schwer einzuschätzen und zu modellieren

Es zeigt sich also, dass eine Einschätzung von Vermeidungsstrategien für die ATHG nicht nur die fossilen Brennstoffe, sondern auch den Einfluss von Landnutzung, Landwirtschaft und Massentierhaltung in Betracht ziehen muss. Durch die Treibhauswirksamkeit des troposphärischen Ozons muss auch die Rolle des Transport- und Verkehrssektors bei der Verbrennung fossiler Ressourcen aufgelöst werden. Es ist zwar anzunehmen, dass eine Transformation des Energiesystems von fossilen zu erneuerbaren Quellen mit einer Substitution des Treibstoffs auf

dem Verkehrssektor einhergehen wird, doch wird die Art des Treibstoffs vom Technologiemix der erneuerbaren Energien abhängen. Aufgrund der Komplexität des Problems konnte die Klimaschutzwirkung von kombinierten Klimaschutzstrategien für alle Sektoren und Treibhausgase noch nicht in vollem Umfang untersucht werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Modell MIND beschäftigt sich mit der Abwägung zwischen erneuerbaren Quellen und fossilen Brennstoffen auf dem Energiesektor, und betrachtet weder Landnutzungsmuster, noch den Verkehrs- und Transportsektor. Es kann daher keine Vermeidungsstrategien für die CO₂-Emissionen aus der Landnutzung und die ATHG modellieren. Stattdessen müssen exogene Annahmen über die zukünftige Entwicklung dieser Treibhausgas-Emissionen gemacht werden. Ein zusätzliches Problem stellen die anthropogenen Emissionen von Aerosolen dar, die eine abschwächende Wirkung auf den Treibhauseffekt haben. Hier ist zu unterscheiden zwischen Sulphataerosolen, die im wesentlichen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen, und organischen Aerosolen und Ruß, die zur Hälfte auch aus der Verbrennung von Biomasse stammen [Penner, 2001]. Aufgrund der direkten Verbindung zwischen den Sulphatmissionen und den CO₂-Emissionen des fossilen Energiesektors haben wir deren Werte in den Modellrechnungen aneinander gekoppelt. Der Ausstoß von organischen Aerosolen und Ruß wird dagegen durch ein exogenes Szenario festgelegt.

Zur Festlegung der Emissionen von CO₂ aus Landnutzung, organischen Aerosolen, Ruß und der anderen Treibhausgase haben wir zwei Szenarien gewählt:

- **Szenario B2:** Zunächst wollen wir ein Szenario betrachten, in dem sich die Emissionspfade der ATHG zwar weitgehend unabhängig von der Entwicklung auf dem Energiesektor verhalten, aber trotzdem einer Storyline für eine sich zur Nachhaltigkeit entwickelnden Welt entsprechen. Zu diesem Zweck wählen wir das SRES B2(preliminary) Marker-Szenario [Nakićenović and Swart, 2000] zur Bestimmung der ATHG- und CO₂-Landnutzungsemissionen. Da die SRES-Szenarien nur bis zum Jahr 2100 spezifiziert sind, die Modellrechnungen mit MIND zur Einschätzung der Klimaschutzwirkung verschiedener Entwicklungspfade aber bis zum Jahr 2300 reichen, müssen wir eine zusätzliche Festlegung für das Verhalten der Emissionen nach 2100 treffen. Für diesen Zeitraum werden die CO₂-Emissionen aus der Landnutzung und die ATHG-Emissionen auf

ihren Wert im Jahr 2100 eingefroren. Der Strahlungsantrieb aus den Emissionen von organischen Aerosolen und Ruß wird für den gesamten Zeitraum auf einen Wert von -0.2 W/m^2 gesetzt.

- **Szenario STOP:** Zudem wollen wir noch einen zweiten Fall betrachten, in dem es im Bereich der ATHG zu substantiellen Emissionsvermeidungen kommt. Zur Simulation dieses Falls wählen wir ein Szenario, in dem die Emissionen von Methan, Distickstoffoxid und der indirekten Treibhausgase auf ihren Wert im Jahr 2000 eingefroren werden. Die verbleibenden ATHG, die CO_2 -Landnutzungsemissionen und der Ausstoß von organischen Aerosolen und Ruß werden wie in Szenario B2 behandelt.

Um die vorgestellten Szenarien in die Analyse einbinden zu können, haben wir das an MIND gekoppelte Klimamodell gegenüber dem Zwischenbericht an den Beirat erweitert. Die erweiterte Version (s. Appendix B) ist nun in der Lage, exogene Pfade für den Strahlungsantrieb der ATHG und Aerosole zu berücksichtigen. Zur Umsetzung der Szenarien B2 und STOP in Pfade für den Strahlungsantrieb wurde das ICLIPS-Klimamodell [Bruckner et al., 2002] benutzt. Für das Beispiel einer 1%igen CO_2 -Reduktion pro Jahr auf dem fossilen Energiesektor zeigt Abb. 3.1 die Veränderung im Verlauf des Strahlungsantriebs, wenn nicht nur der Beitrag des CO_2 , sondern auch der ATHG und Aerosole berücksichtigt wird. Aufgrund der Aerosolmaske liegt am Anfang des Jahrhunderts der gesamte Strahlungsantrieb etwas unterhalb des reinen CO_2 -Antriebs. Da die maßgeblich für den maskierenden Effekt verantwortlichen Sulphataerosole an die CO_2 -Emissionen gekoppelt sind, wird mit der Reduktion von CO_2 auch die Aerosolmaske abgebaut. Dieser antriebssteigernde Effekt verstärkt sich durch ein kontinuierliches Ansteigen der ATHG, so dass es zum Ende des Jahrhunderts zu einem beträchtlich größeren Gesamtstrahlungsantrieb als im reinen CO_2 -Fall kommt.

Angesichts dieses Beispiels stellt sich natürlich die Frage, inwieweit eine eindimensionale Klimaschutzstrategie, die zwar durch die Transformation des Energiesystems zu drastischen CO_2 -Reduktionen führen kann, auf den Verlauf der ATHG aber nur geringen Einfluss hat, eine Einhaltung strikter Klimaleitplanken gewährleisten kann. Hierzu haben wir mit dem an MIND gekoppelten Klimamodell sechs Szenarierechnungen durchgeführt, die den Grenzbereich denkbarer Reduktionsmaßnahmen

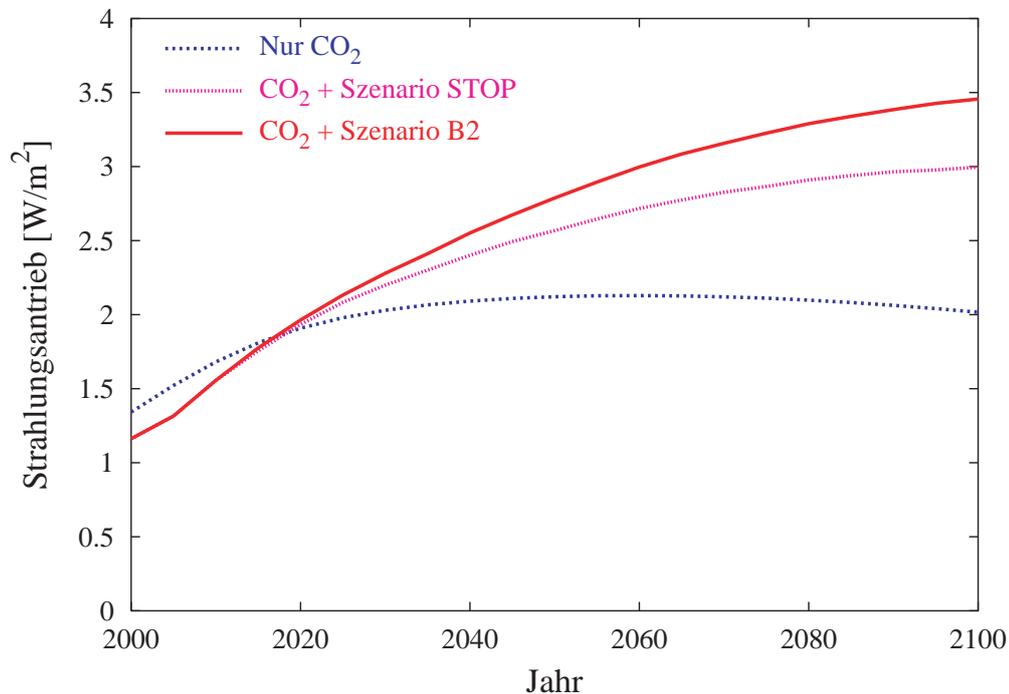


Abbildung 3.1: Strahlungsantrieb ohne und mit Hinzunahme der anderen Treibhausgase und Aerosole.

ausloten und sogar überschreiten.

- Szenarien 1%CO₂-B2, 1%CO₂-STOP, 1%CO₂-AUS:** Die CO₂-Emissionen aus der fossilen Energiewirtschaft werden ab dem Jahr 2000 um ein Prozent pro Jahr verringert. Dies entspricht einer drastischen CO₂-Reduktion, die angesichts der heutigen weltpolitischen und ökonomischen Lage kaum zu erreichen sein wird. Die ATHG-, CO₂-Landnutzungs-, Ruß- und organischen Aerosolemissionen werden entsprechend den Szenarien B2 oder STOP festgeschrieben. Obwohl STOP deutliche Vermeidungsmaßnahmen für die Emissionen von Methan, Distickstoffoxid und indirekten Treibhausgasen verlangt, sind diese weniger drastisch als bei den energiebedingten CO₂-Emissionen (Einfrieren gegenüber 1% Reduktion pro Jahr). Als Referenz betrachten wir das Szenario „1%CO₂-AUS“ in dem nur die Wirkung des Kohlendioxidausstosses auf das Klima berücksichtigt wird.
- Szenarien 4%CO₂-B2, 4%CO₂-STOP, 4%CO₂-AUS:** Wir gehen noch einen Schritt weiter, und nehmen zwei Klimaschutzszenarien mit einer 4%igen

Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen an. Diese Szenarien sind in der Realität unerreichbar und dienen lediglich dazu, die Grenzen von isoliert auf die energiebedingten CO₂-Emissionen zugeschnittenen Klimaschutzstrategien auszuloten.

Abb. 3.1 verdeutlicht die Zunahme der Klimareaktion, wenn zum Strahlungsantrieb nicht nur die CO₂-Emissionen, sondern auch die ATHG-Emissionen beitragen. Betrachtet man nur das Kohlendioxid, so scheinen die starken CO₂-Reduktionsvorgaben das *WBGU-Fenster* selbst bei hoher Klimasensitivität einhalten zu können. Nimmt man dagegen die Wirkung der Aerosole und ATHG hinzu, so kann das WBGU-Fenster nur noch für eine sehr kleine Klimasensitivität eingehalten werden. Im Fall einer mittleren Klimasensitivität reichen die CO₂-Reduktionen dafür nicht mehr dafür. Hier verbleibt das Klima lediglich in einer auf (2.5 K, 0.25 K/dek) erweiterten Version des WBGU-Fensters (*Mittleres Fenster*). Nimmt man für die Entwicklung der ATHG das Szenario B2 an, so wird selbst dieses Fenster verlassen. Für eine hohe Klimasensitivität läuft das Klima sogar aus einem auf (3 K, 0.3 K/dek) stark erweiterten WBGU-Fenster (*Großes Fenster*). Interessant ist auch der Einfluss der Aerosole auf die Klimaentwicklung. Durch das schnellere Wegreißen der Aerosolmaske bei einer CO₂-Reduktion von 4%, kommt es hier zunächst zu einem schnelleren Temperaturanstieg als im Fall einer CO₂-Reduktion von nur 1%.

Die Sensitivitätsanalyse in Abb. 3.2 legt nahe, dass eine isolierte, nur auf die Reduzierung von energiebedingten CO₂-Emissionen ausgerichtete Klimaschutzstrategie zur Einhaltung des WBGU-Fensters nicht ausreichen wird. Allerdings müssen zur Bestätigung dieser Einschätzung noch Experimente mit elaborierteren Klimamodellen durchgeführt werden. Hierfür bietet sich zunächst das Modell MAGICC [Raper et al., 2001] an, das zur Projektion zukünftiger Klimaentwicklungen im Third Assessment Report (TAR) des IPCC verwendet wurde Cubasch and Meehl [2001]. Zusätzlich sollte aber auch noch ein Modell von intermediäre Komplexität wie CLIMBER [Rahmstorf and Ganopolski, 1999] zu Rate gezogen werden. Das an MIND gekoppelte Energiebilanzmodell kann zwar die von MAGICC modellierten Temperaturantworten auf die SRES-Szenarien reproduzieren (s. Appendix B), ist aber für kompliziertere Verläufe des Strahlungsantriebs, wie sie bei Klimaschutzszenarien auftreten, zu einfach, um Aussagen über die grundsätzliche Einhaltung

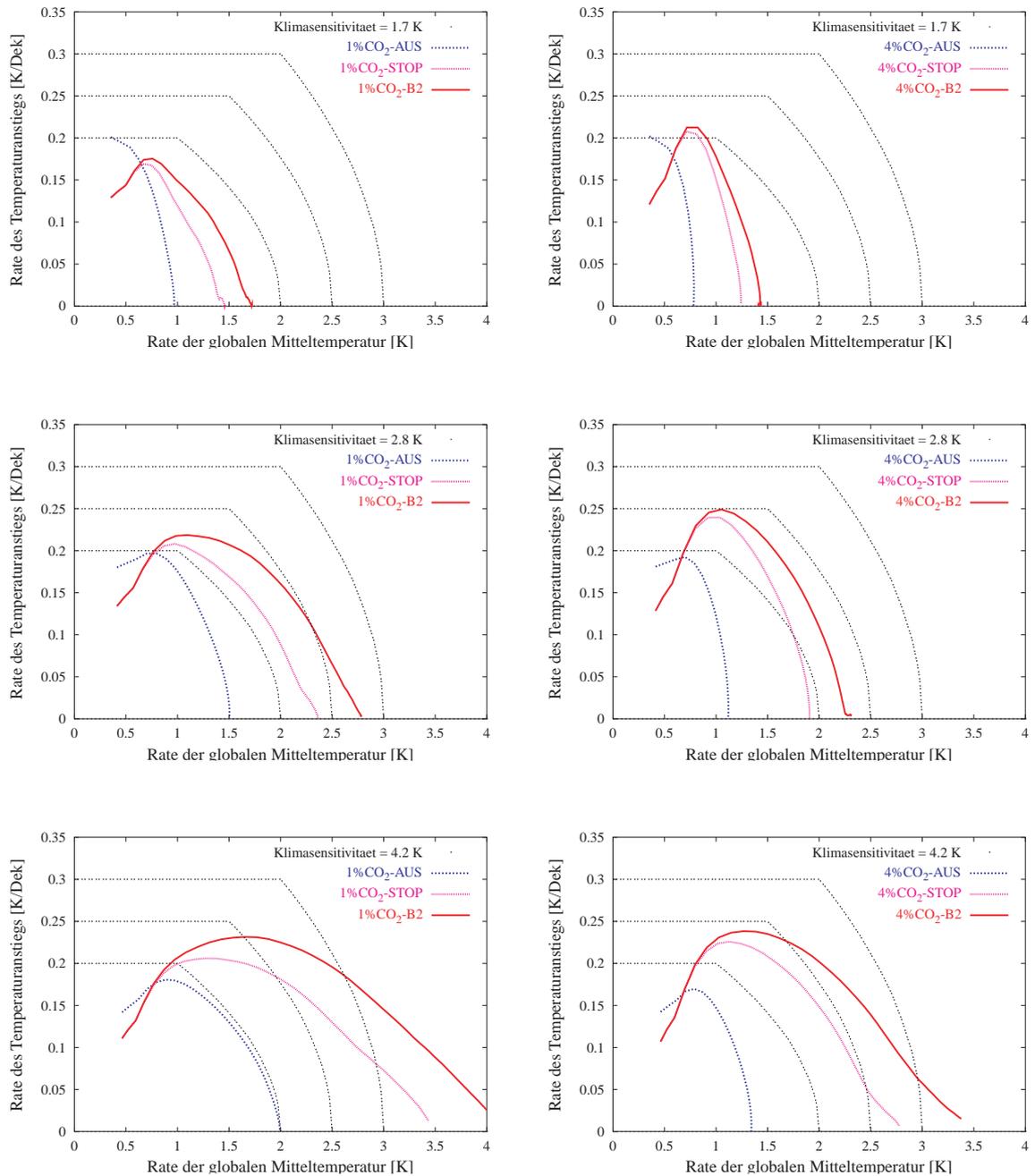


Abbildung 3.2: Reaktion des Klimas auf die Emissionsszenarien 1%CO₂-B2, 1%CO₂-STOP, 1%CO₂-AUS (linke Spalte) und 4%CO₂-B2, 4%CO₂-STOP, 4%CO₂-AUS (rechte Spalte) für drei verschiedene Werte der Klimasensitivität. Zusätzlich gezeigt sind die Klimaleitplanken des WBGU-Fensters (2 K, 0.2 K/dek), eines „mittleren“ Fensters (2.5 K, 0.25 K/dek) und eines „großen“ Fensters (3 K, 0.3 K/dek).

des WBGU-Fensters treffen zu können. Das ist auch nicht Aufgabe dieses Berichtes, in dem das Zusammenwirken von technologischem Fortschritt und Klimaschutz zur Induzierung einer Transformation des Energiesystems im Mittelpunkt stehen.

Aufgrund des großen Einflusses der ATHG auf den Temperaturpfad des Klimamodells können wir im Regelfall (Szenario STOP, mittlere Klimasensitivität) nur solche Transformationen des Energiesystems modellieren, welche durch Vermeidung energiebedingter CO₂-Emissionen die Einhaltung des mittleren Klimafensters gewährleisten. Die Einhaltung des WBGU-Fensters werden wir im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse im Falle einer kleinen Klimasensitivität fordern. Dagegen müssen wir im Falle einer hohen Klimasensitivität das große Fenster als Klimaleitplanke wählen, um eine klimaschutzwirksame Transformation des Energiesystems identifizieren zu können.

3.2 Welche Optionen gibt es?

Bei der Verminderung von Treibhausgasen stehen fünf Optionen zur Diskussion: Bevölkerungspolitik, Suffizienz, Steigerung der Energieeffizienz, Verminderung der Kohlenstoffintensität und Geo-engineering. Diese fünf grundlegenden Vermeidungsoptionen lassen sich anhand der sogenannten BAUER-KAYA Identität verdeutlichen, die in der Global Change Forschung eine wichtige Rolle spielt. Wir benutzen sie als heuristisches Instrument, das gegenüber der ursprünglichen KAYA-Identität erweitert wird. Die Modifikation bezieht sich dabei auf die Einbeziehung des Geo-Engineering. Gegenüber der ursprünglichen Kaya-Formel wurde der Quotient $(CO_2)_a/CO_2$ hinzugefügt, um den möglichen Beitrag des Geo-Engineering zu erfassen. Dabei stellt $(CO_2)_a$ die Emissionen dar, die tatsächlich in die Atmosphäre gelangen. Mit Hilfe der BAUER-KAYA Formel (Abbildung 3.3) lassen sich fünf grundlegende Vermeidungsstrategien ableiten:

1. **Bevölkerungspolitik:** Dabei wird versucht, das Bevölkerungswachstum politisch zu steuern durch Bildungsmaßnahmen, Familienplanung etc.
2. **Suffizienzstrategie:** Hier wird eine Begrenzung des Pro-Kopf-Konsums angestrebt. Bei dieser Strategie kommt es darauf an, das herkömmliche Sozialprodukt als Indikator für Wohlstand abzulösen durch die Vorstellung von

qualitativer Verbesserung des Lebens, die nicht mit einer weiteren Erhöhung des Energie- und Materialverbrauchs einhergehen muss.

3. **Effizienzstrategie:** Durch technischen Fortschritt soll der Primärenergieverbrauch verringert werden.
4. **Substitutionsstrategie:** Hier geht es nicht darum, den Primärenergieverbrauch zu verringern, sondern einen Energiemix zu wählen, der weniger Kohlenstoff produziert.
5. **Geo-Engineering:** Allgemein handelt es sich dabei um Maßnahmen, die darauf abzielen, der Atmosphäre Emissionen zu entziehen. Dabei lassen sich Maßnahmen des „weichen“ von denen des „harten“ Geo-Engineerings unterscheiden [Schneider, 2001]. Bei weichem Geo-Engineering wird der Kohlenstoff der Atmosphäre entzogen und durch biologische Senken gebunden. Beim harten Geo-Engineering sollen die Emissionen von Kohlenstoff vermieden werden und dieser entweder im tiefen Ozean oder in geologischen Formationen eingelagert werden. Wir werden uns im weiteren nur mit Maßnahmen des harten Geo-Engineering beschäftigen. Der Grund liegt in einer arbeitsökonomischen Beschränkung.

Anhand der ursprünglichen KAYA-Identität lassen sich in einer ersten Näherung stilisierte Fakten gewinnen (Abbildung 3.4).

Dabei zeigt sich, dass das Bevölkerungswachstum für die Dynamik der CO₂ Emissionen nur in Afrika und Lateinamerika eine Rolle spielt. Es wird auch deutlich, dass im Hinblick auf die Steigerung der Energie- und Kohlenstoffintensität erhebliche Unterschiede zwischen den Weltregionen bestehen. Wie Abbildung 3.3 zeigt, spielt auch für das Aggregat „Welt“ das Wirtschaftswachstum eine viel entscheidendere Rolle als das Bevölkerungswachstum. Die Kohlenstoff- und Energieintensität ist ebenfalls beträchtlich gesunken. Diese Effizienzgewinne wurden vor allem durch das Wirtschaftswachstum überkompensiert. Bereits an dieser Stelle zeigt sich, dass Effizienzgewinne, sollen sie zu einer nachhaltigen Senkung der Emissionen führen, eine Wachstumsrate aufweisen müssen, die die addierten Wachstumsraten der Bevölkerung und des Sozialproduktes überkompensiert. Dies war jedoch bislang in keiner Weltregion der Fall.

Die Frage ist mithin, welche Faktoren überhaupt sinnvoll gesteuert werden können. Wir nehmen an dieser Stelle ein erstes Assessment vor.

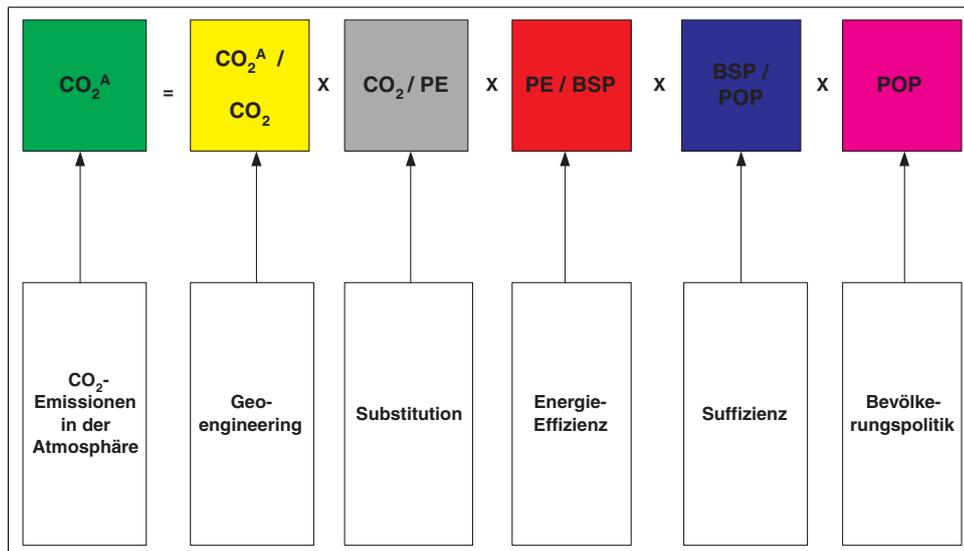


Abbildung 3.3: Die BAUER-KAYA Identität zeigt die fünf grundlegenden Vermeidungsoptionen.

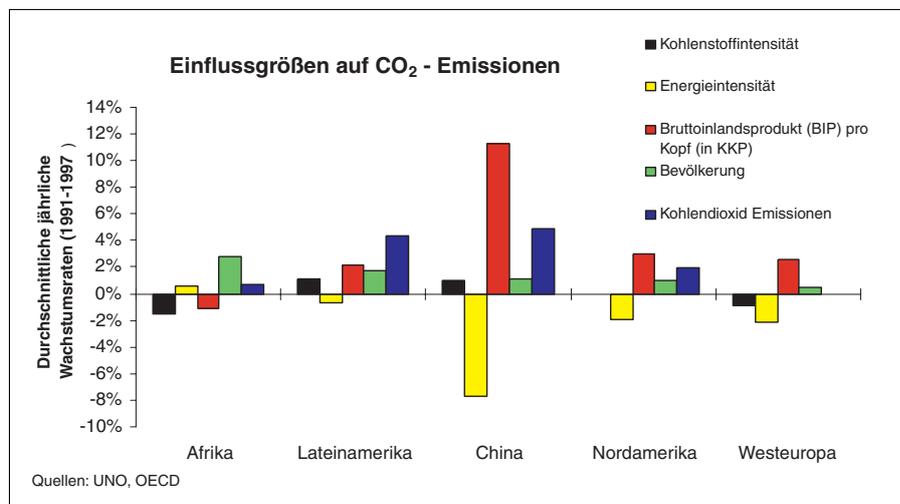


Abbildung 3.4: KAYA-Formel nach Weltregionen.

3.2.1 Bevölkerung

Die Weltbevölkerung wird von 6,1 Milliarden Menschen im Jahre 2000 auf etwa 11 bis 12 Milliarden im Jahr 2100 anwachsen. Dabei wird die Zunahme in den Entwicklungsländern am größten sein. Bevölkerungswissenschaftler wie Bongaarts [1994] ge-

hen davon aus, dass sich die Bevölkerung auf ein Niveau von 7.3 Milliarden im Jahr 2100 stabilisieren ließe, wenn es gelänge, angemessene Verhütungsmethoden in den Ländern mit hohem Bevölkerungswachstum durchzusetzen. Die Hindernisse für eine solche Politik sind beträchtlich, so dass sich die Bevölkerungszahl weltweit wohl bei etwa 9 bis 10 Milliarden stabilisieren dürfte. Obwohl sich das Bevölkerungswachstum vergleichsweise gut voraussagen lässt, ist es einer direkten politischen Steuerung nur schwer zugänglich, ganz zu schweigen von den ethischen und sozialen Problemen, die eine Bevölkerungspolitik (Beispiel China) aufwirft.

Aber selbst wenn sich die Bevölkerung auf einem Niveau von 7.3 Milliarden stabilisieren ließe, stellt sich die Frage, wieviel für die Verminderung von CO₂-Emissionen dadurch gewonnen wäre. Mit Hilfe der KAYA-Identität lässt sich die Wirkung des Bevölkerungswachstums nicht abschätzen, da eine Veränderung des Bevölkerungswachstums alle anderen Variablen der KAYA Identität beeinflusst. Unklar ist jedoch, in welcher Richtung und mit welchem Gewicht diese Variablen beeinflusst werden.

In der Literatur finden sich hierzu zwei Sichtweisen. So wird zum einen behauptet, eine wachsende Bevölkerung erhöhe die Emissionen. Diese Wirkungskette ist aber nicht zwingend, denn steigendes Bevölkerungswachstum kann auch die Emissionen vermindern, wenn eine wachsende Bevölkerung das Einkommen erhöht: Der Grund für steigende Einkommen trotz Bevölkerungswachstums sind steigende Skalenerträge - durch eine größere Bevölkerung lassen sich die Vorteile großer Märkte realisieren. Das erhöhte Einkommen ermöglicht aber auch vermehrte Investitionen in Forschung und Entwicklung, die der Erhöhung der Energieeffizienz oder der Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energieträger dienen können [Simon, 1996]. Beide Positionen lassen sich theoretisch rechtfertigen, beide Positionen lassen sich je nach Region empirisch stützen. Dies scheint ein deutlicher Hinweis darauf zu sein, dass eine aggregierte Betrachtung hier zu Fehlurteilen führt.

Sensitivitätsanalysen im Rahmen von Integrated Assessment Modellen weisen in folgende Richtung: In optimalen Wachstumsmodellen (zur Diskussion siehe O'Neill et al. [2001], Manne and Richels [1992]) wirkt eine Erhöhung der Wachstumsrate der Bevölkerung wie eine Verminderung der Diskontrate, was zu einer größeren Emissionsverminderung in der Gegenwart führt. Sensitivitätsanalysen in diesen Modellen haben gezeigt, dass Variationen in den Bevölkerungsszenarien stark auf den Zeitpfad der Emissionen durchschlagen. Allerdings wurden diese Sensitivitätsanalysen mit Modellen durchgeführt, in denen der technische Fortschritt exogen modelliert

ist. Wie aber bereits oben erwähnt, ist es entscheidend, wie die Bevölkerungsentwicklung auf den technischen Fortschritt wirkt. Die Sensitivitätsanalysen mit MIND deuten darauf hin, dass das Bevölkerungswachstum auf den technischen Fortschritt zwar eine stimulierende Wirkung hat. So erhöht das Bevölkerungswachstum die Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen zur Erhöhung der Energieeffizienz; auch die Investitionen in den Sektor der erneuerbaren Energien steigt. Diese Investitionen reichen jedoch nicht aus, um die Erhöhung der Emissionen durch eine steigende Industrieproduktion zu kompensieren. Daraus ergeben sich netto leicht erhöhte Emissionen. Im Umkehrschluß ergibt sich daraus, dass selbst eine Stabilisierung der Weltbevölkerung bei 15 Milliarden anstatt bei 11 Milliarden das Maximum der CO₂-Konzentration nur um etwa 100 ppm vermindert. Hält man sich einerseits vor Augen, wie schwierig sich die direkte Steuerung der Bevölkerungszahl gestaltet und wie entscheidend der technische Fortschritt ist, erscheint die Frage berechtigt, ob die Bevölkerungspolitik überhaupt eine sinnvolle Option für einen wirksamen Klimaschutz ist. Erste Modellrechnungen deuten darauf hin, dass dies nicht der Fall ist. Um hier jedoch zu einem abschließenden Urteil zu kommen, ist weitere Forschung notwendig. Wir werden in diesem Bericht nur die restlichen vier Optionen genauer betrachten.

Diese Einschätzung ändert sich auch nicht grundlegend, wenn man die anderen Treibhausgase wie etwa Methan in die Berechnung miteinbezieht. Die Methanemissionen sind nur zu einem Drittel energiebedingt, die restlichen Zweidrittel entstammen der landwirtschaftlichen Produktion (Reisanbau und Rinderzucht). Will man die Wirkung der Bevölkerungspolitik auf die Methanemissionen analysieren, reichen selbst für eine approximative Abschätzung 0-dimensionale Weltmodelle nicht aus. Die Wirkung des Bevölkerungswachstums auf die Landwirtschaftsproduktion kann je nach institutionellen Voraussetzungen in verschiedenen Regionen sehr unterschiedlich ausfallen. So kann ein moderates Bevölkerungswachstum den Strukturwandel hin zu einer vermehrten Industrieproduktion fördern. Denkbar ist auch, dass Länder in einer „poverty trap“ gefangen bleiben: Eine geringe Kapitalausstattung in der Landwirtschaft und niedrige Einkommen bieten für Familien einen Anreiz zu hoher Kinderzahl, die wiederum den Spielraum für Investitionen in industrielles Kapital vermindern und zugleich Ursache sind für einen weiteren Anstieg landwirtschaftlicher Produktion, der zu gering ist, um einen Überschuß für Investitionen zu erzeugen, aber hoch genug, um etwa die Methanemissionen zu erhöhen. Wir werden

diese Frage hier nicht weiter verfolgen. Eine genauere Analyse des Zusammenhanges von Bevölkerungsentwicklung, Landwirtschafts- und Energiesektor in verschiedenen Regionen verdiente eine genauere Analyse. Es wäre wünschenswert, diesen Zusammenhang in regional aufgelösten Wachstumsmodellen genauer zu untersuchen.

3.2.2 Suffizienzstrategie

Das Pro-Kopf Einkommen der Weltwirtschaft wird in den nächsten 50 Jahren weiter mit einer positiven Rate wachsen - in den Schwellenländern etwas schneller, in den alten Industrienationen etwas langsamer; weltweit wird es etwa 2-3% jährlich zunehmen. Es ist dabei nicht ausgeschlossen (und zu hoffen), dass Regionen, die bislang nicht wachsen, sondern sogar schrumpfen (etwa Afrika) einen Wachstumspfad einschlagen werden. Es wäre gewiss keine kluge Strategie, wollte man im Namen einer Klimaschutzpolitik das Wachstum des Pro-Kopf-Einkommens in den nächsten 50 Jahren beschränken oder gar eine Wachstumsrate von Null anstreben. Die Verteilungskonflikte innerhalb der Industrieländer nähmen zu und damit auch die Verteilungskonflikte zwischen Entwicklungs- und Industrieländern. Die reichen Gesellschaften könnten innerhalb der nächsten hundert Jahre lernen, ihre Verteilungskonflikte auch dann noch zu meistern, wenn es kein Wachstum gibt. Für die nächsten 50 Jahre erscheint es aber als unrealistisch, dass die Weltgesellschaft als ganze ihre Verteilungskonflikte ohne Wachstum handhaben kann (eine formale Behandlung dieses Problems findet sich in Edenhofer and Jaeger [1998]). Die Suffizienzstrategie dürfte für die nächsten 50 Jahre keine sinnvolle Option sein. Gerade die Forderung internationaler Gerechtigkeit lässt die Suffizienzstrategie im Zwielficht erscheinen. Dies schließt jedoch nicht aus, dass aus anderen als wirtschaftlichen Gründen die Wachstumsraten innerhalb der OECD zurückgehen werden. Es kommt jedoch darauf an, ob eine Klimaschutzstrategie auch dann noch erfolgversprechend ist, wenn während nächsten Jahrzehnte materialistische Präferenzen dominant bleiben und soziale Konflikte nur unter der Bedingung eines ausreichenden Wirtschaftswachstums handhabbar bleiben.

Beide Fragen hängen eng mit der Evolution von Lebensstilen zusammen. Dabei ist einerseits offen, ob post-materialistische Lebensstile tatsächlich mit einem geringeren Energieverbrauch verbunden sind, andererseits ist zu fragen, mit welcher Geschwindigkeit sich post-materialistische Präferenzen überhaupt durchsetzen können. Sowohl die Richtung eines solchen Präferenzwandels als auch seine Geschwindigkeit

werden mit sozialen Konflikten einhergehen. Offen ist auch hier, ob diese Konflikte ohne Wachstum der Einkommen tatsächlich gemeistert werden können. Für die empirische Lebensstilforschung eröffnet sich hier ein weites Feld.

3.2.3 Effizienzstrategie

Der Einsatz von Energie, der benötigt wird, um eine Einheit Sozialprodukt zu produzieren, wird als Energieintensität bezeichnet. Diese ist in den Industrieländern in den letzten hundert Jahren um 1% pro Jahr gefallen. Um die globalen Emissionen zu senken, wäre jedoch eine Senkung der Energieintensität nötig, die weit über der Rate von 1% pro Jahr liegt. Eine Verringerung der Energieintensität in diesem Umfang wäre in der Wirtschaftsgeschichte völlig neu. Die industriellen Kernzonen USA, Japan und Europa haben beträchtliche Erfahrungen gesammelt, den technischen Fortschritt so einzusetzen, dass er die Arbeitseffizienz erhöht und damit auch das Pro-Kopf-Einkommen. In den Industriestaaten müsste jedoch die Energieintensität schneller sinken als die Arbeitseffizienz steigt, wenn es zu einer Verminderung der Emissionen kommen soll. Bislang sind die Investitionen in die Erhöhung der Arbeitseffizienz rentabler als die Investitionen in die Erhöhung der Energieeffizienz. Auch wenn langfristig das fossile Energiesystem durch ein regeneratives abgelöst wird, so wird man für eine relativ lange Übergangsphase die Effizienz der fossilen Energienutzung steigern müssen.

3.2.4 Substitutionsstrategie

Die Kohlenstoffintensität misst, wie viel Kohlenstoff eine Einheit Primärenergie verursacht. Sie ist weltweit im Durchschnitt um 0,2% gefallen. Sogar in den USA und Westeuropa ist sie gesunken. Dennoch müsste die Kohlenstoffintensität deutlich stärker sinken, um den Wachstumseffekt des Einkommens und der Weltbevölkerung auf die Emissionen zu kompensieren.

Langfristig führt an einer Substitutionsstrategie kein Weg vorbei. So vernünftig diese Option erscheint, so schwierig ist es, sie zu realisieren. Die Vorräte von Kohle, Öl und Gas werden noch bis zum Ende dieses Jahrhunderts zu leicht steigenden Grenzkosten genutzt werden können [Rogner, 1997]. Erst im 22. Jahrhundert werden die Grenzkosten der Energienutzung dramatisch steigen. Dies schließt nicht aus, dass es zu regionalen Verschiebungen in der Öl-, Kohle- und Gasgewinnung kommen

wird, mit nicht unbeträchtlichen Störungen auf den Ressourcenmärkten. Global aber werden Kohle, Öl und Gas im 21. Jahrhundert wahrscheinlich nicht knapp. Von den Ressourcenmärkten wird daher kein anhaltender Druck auf Unternehmen und Verbraucher ausgehen, die Kohlenstoff- und Energieintensität so weit zu senken, dass es zu sinkenden CO₂-Emissionen kommt. Auch bei optimaler Nutzung von fossiler Energie würde Kohlenstoff in einem Umfang freigesetzt, der es unmöglich macht, ein akzeptables Temperaturfenster einzuhalten. Nicht die Ressourcenmärkte stellen in Zukunft eine Grenze dar, sondern das Klima! Dennoch stellen die Ressourcenmärkte für die Klimapolitik ein Problem dar. Wie sich noch zeigen wird, schränken sie den wirtschaftlichen Handlungsspielraum der Klimapolitik ein (siehe Abschnitt 4.3)

Der Ausbau der Kernenergie wäre eine weitere Option, den Verbrauch fossiler Energie zu reduzieren. Weltweit beträgt der Anteil der Nuklearenergie an der gesamten Primärenergieproduktion 6 %; der Anteil an der Erzeugung von Elektrizität beträgt immerhin 16 % [World Energy Assessment Report, 2000, S. 6]. Die meisten Analysen gehen davon aus, dass sich dieser Anteil nicht erhöht. Nuklearenergie hat sich als kostspieliger herausgestellt als ursprünglich angenommen. Die Kosten pro Kilo wattstunde sinken nicht mehr und beginnen leicht zu steigen. Politische, ökonomische und sicherheitstechnische Gründe sprechen dagegen, dass sich zumindest in Europa und den USA ein drastischer Ausbau der Kernenergie durchsetzen lässt. Auch dürfte ein Ausbau der Kernenergie außerhalb der OECD wohl kaum im Sicherheitsinteresse Europas und der USA liegen. Zwar ist es in der Vergangenheit gelungen, die zivile und militärische Nutzung der Nukelartechnik zu trennen. Sollte jedoch die Nuklearenergie in größerem Umfang genutzt werden, sind hier weitere Anstrengungen nötig, die militärische und zivile Nutzung zu trennen. Die Kernenergie stellt Anforderungen an die innere und äußere Sicherheit, die in den Teilen der Welt mit großem „Energiehunger“ kaum gegeben sein dürften. Aus klimapolitischer Perspektive ist der Ausbau der Kernenergie selbst dann bedeutungslos, wenn der Anteil der Kernenergie auf 32% an der Primärenergieproduktion bis zum Jahr 2050 erhöht und der Rest der Produktion hauptsächlich mit Kohle bestritten würde. Ein solcher Pfad würde immer noch zu einer „Klimakatastrophe“ führen (siehe back-to-coal Szenarien von IIASA [2001]). Die Kernfusion wäre natürlich eine Back-Stop-Technik, sie wird aber wahrscheinlich nicht kommerziell einsetzbar sein vor dem Jahr 2050. Global gesehen ist die Kernenergie vermutlich keine ökonomische und politische Lösung des Klimaproblems.

Auch der Einsatz erneuerbarer Energien ist keineswegs ohne Risiken: Einerseits kann der partielle Einsatz erneuerbarer Energien zur weiteren Steigerung von Emissionen führen. Zum anderen können auch beim Einsatz erneuerbarer Energien nicht unbedeutende ökonomische und ökologische Probleme auftreten. So könnte in Zukunft Wasserstoff als Sekundärenergieträger für die Energieversorgung und für den Verkehr an Bedeutung gewinnen. Mit Wasserstoff kann weitgehend emissionsfrei gefahren und geheizt werden. Zu einer Verminderung der globalen Emissionen kommt es jedoch nur dann, wenn Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen gewonnen wird (z.B. aus Solarenergie).

Beim Einsatz von Biomasse kann es zu erheblichen Konflikten in der Landnutzung kommen. Für die Biomasseproduktion stehen in diesem Jahrhundert 700 bis 1400 Millionen Hektar Land zur Verfügung, ohne dass es zu Nutzungskonflikten mit der Nahrungsmittelproduktion kommt World Energy Assessment Report [2000, S. 223ff]. Zur Zeit werden etwa 400 EJ Primärenergie pro Jahr produziert. Geht man davon aus, dass die Primärenergieproduktion im Lauf der nächsten 50 Jahre auf das 10-fache wachsen wird, und die gesamte Primärenergieproduktion durch Biomasse erfolgen soll, wäre ein erheblicher Flächenbedarf nötig (siehe Tabelle 3.1). Diese Fläche könnte bereit gestellt werden, wenn es in der Landwirtschaft und in der Produktion von Biomasse gleichermaßen zu bodensparendem technischen Fortschritt in einer Größenordnung von 2 % pro Jahr käme. Es handelt sich hier um eine sehr grobe Überschlagsrechnung, die aber vor allem eines zeigen soll: Der massive Einsatz erneuerbarer Energien kann zu einer zunehmenden Bodenknappheit führen. Die Knappheit des Bodens könnte dazu führen, dass wir in der langen Sicht nicht genügt, den Pfad einer Niedrig-Emissions-Wirtschaft einzuschlagen, sondern den Pfad einer Niedrig-Energiewirtschaft. Eine realistische Option für erneuerbare Energien erfordert eine genauere Analyse der limitierenden Faktoren bei den erneuerbaren Energien. Mit der nachfolgenden Tabelle wollen wir eine Diskussion über plausible Größen anstoßen.

In der Vergangenheit hat es durchaus einen bodensparenden technischen Fortschritt in der oben veranschlagten Größenordnung gegeben, allerdings ist zu fragen, wodurch er in Zukunft zustande kommen soll. Der massive Einsatz von Gentechnik in der Landwirtschaft käme hier in Frage; freilich kann über deren Einsatz nicht allein auf der Basis ökonomischer Einschätzung entschieden werden. Sollte ein bodensparender technischer Fortschritt nicht in dieser Größenordnung realisierbar sein,

Tabelle 3.1: Die limitierenden Faktoren bei den erneuerbaren Energien

	Leistung in W/m²	Zusätzlicher Flächenbedarf	Flächen- potential	Bodensparender technischer Fortschritt
Photovoltaik	5	2572 × 10 ⁶ ha	700 × 10 ⁶ ha	1.3 % p.a.
Biomasse	1.5	8560 × 10 ⁶ ha	700 × 10 ⁶ ha	2.5 % p.a.
Windkraft	80	16 × 10 ⁶ ha	700 × 10 ⁶ ha	0.0 % p.a.

käme es zu massiven Landnutzungskonflikten und zu steigenden Bodenrenten auf Kosten der Einkommensanteile von Kapital und Arbeit.

Aber nicht nur Biomasse, sondern auch Photovoltaik und Windkraft haben einen nicht unerheblichen Land-, Kapital- und Energiebedarf. Empirische Untersuchungen zeigen zwar, dass die Kosten pro Kilowattstunde von regenerativen Energien im Zeitablauf sinken, weil durch „learning by doing“ beträchtliche Effizienzsteigerungen möglich sind. Windkraft und Photovoltaik weisen hier ebenfalls ein beträchtliches Potential auf. Ob die Lerneffekte ausreichen, um die Leistung pro Hektar so zu steigern, dass erneuerbare Energien gegenüber Öl, Kohle und Gas konkurrenzfähig werden, ist noch offen und wird im nächsten Abschnitt ausführlich diskutiert. Hier möge der Hinweis genügen, dass auch der massive Einsatz erneuerbarer Energien keineswegs ohne ökonomische und ökologische Risiken ist.

3.2.5 Geo-Engineering

Unter Geo-Engineering kann zum einen verstanden werden der Aufbau biologischer Senken, um der Atmosphäre CO₂ zu entziehen, oder aber die Verklappung und/oder Deponierung der bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehenden Emissio-

nen. Wir werden uns nur mit der letzten der beiden Formen des Geo-engineerings beschäftigen. Zum einen hat sich der WBGU bereits ausführlich mit der ersten Option beschäftigt, zum anderen ist das ökonomische Potential dieser Option langfristig nicht besonders groß, wenn man für die Zukunft einen drastisch steigenden Energieverbrauch erwartet. Die zweite Option wird wahrscheinlich in den Klimaverhandlungen eine wichtige Rolle spielen. Angesichts des Zeitdruckes, der durch die Emissionsdynamik der anderen Treibhausgase (ATHG) verursacht wird, werden Optionen unausweichlich, die diesen Zeitdruck vom Umbau des Energiesystems nehmen. Aus diesem Grund soll diese Option hier genauer diskutiert werden.

Durch Verklappung und/oder Deponierung von CO_2 könnte es möglich werden, weiterhin fossile Brennstoffe zu nutzen, ohne dabei Kohlendioxid in die Atmosphäre zu emittieren. Das bei der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Energieträger freigesetzte CO_2 soll eingefangen und in geeignete Deponien (geologische Formationen, Ozeane) eingelagert werden. Alternativ könnten fossile Brennstoffe in Wasserstoff umgewandelt werden, wobei Kohlendioxid als separates Nebenprodukt anfallen würde.

Ökonomisch gesehen wird dadurch die Deponie „Atmosphäre“ gegen die Deponie „Ozean“ oder „Geologische Formationen“ ausgetauscht. Wenn der Ozean eine unbegrenzte Speicherkapazität hätte, was die Befürworter dieser Option immer behaupten, dann hätten die Emissionen genau den Schattenpreis der fossilen Ressourcen; in diesem Fall wäre nur noch die Ressourcenschranke bindend. Dies entspricht einem business-as-usual Szenario, wie wir es in Abschnitt 4.2 vorstellen. Die fossilen Ressourcen werden bis zum Ende des 21. Jahrhunderts genutzt, erst im nächsten Jahrhundert gewinnen die erneuerbaren Energien an Bedeutung. Die Renten der Ressourcenbesitzer bleiben erhalten, ohne dass das Klimasystem geschädigt würde. Diese Option bedarf aber nicht nur deshalb der genauen Prüfung, weil etwa die Besitzer von Kohle, Öl oder Gas an ihr ein vitales Interesse haben. Seit dem Dritten Sachstandsbericht des IPCC wird das Klimaproblem verschärft wahrgenommen, dies vor allem wegen der neuerkannten Bedeutung der ATHG. Es werden in den nächsten Dekaden sehr viel raschere Schritte nötig sein, um die Emissionen in die Atmosphäre zu reduzieren. Es könnte sich herausstellen, dass eine Lagerung von CO_2 etwa in den geologischen Formationen eine unverzichtbare Option sein wird, wenn man gleichzeitig auf die Atomenergie aus unterschiedlichsten Gründen verzichten will oder muss.

Grundsätzlich besteht der Prozess der Sequestrierung von CO_2 aus drei Schritten.

Zunächst wird das CO₂ aus den Abgasen von fossilen Kraftwerken herausgefiltert. In einem alternativen Dekarbonisationsprozess wird der fossile Brennstoff in CO₂ und den neuen Energieträger zerlegt. In einem zweiten Schritt wird das CO₂ verflüssigt und an den Ort der Deponierung transportiert. Verflüssigung (Komprimierung und Kühlung) sowie Transport (Pipelines) von CO₂ sind heute Standardpraxis und stellen kein Problem dar. Zuletzt wird das CO₂ in eine geeignete Lagerstätte injiziert.

Betrachtet man die drei Prozessschritte von der ökonomischen Seite, dann entfallen nach Modellrechnungen auf das Einfangen des CO₂ ungefähr 70%, auf die Verflüssigung und den Transport etwa 20%, und auf die Deponierung selber nur ca. 10% der Kosten. Die Gesamtkosten der Sequestrierung von CO₂ mit verfügbaren Technologien belaufen sich auf ungefähr 76 US-Dollar pro vermiedener Tonne CO₂ (ca. 280 US-Dollar pro Tonne Kohlenstoff). Diese Kosten könnten möglicherweise durch verbesserte Konzepte auf ca. 25 US-Dollar pro vermiedener Tonne CO₂ gesenkt werden (etwa 95 US-Dollar pro Tonne Kohlenstoff) [Bauer and Flachland, 2002].

Der heute übliche und seit mehreren Jahren verwendete Prozess zum Einfangen von CO₂ aus den Abgasen von fossilen Kraftwerken ist die sogenannte Chemische Absorption. Dabei wird eine Chemikalie (üblicherweise Monoethanolamin, MEA) mit einem CO₂-haltigen Abgasstrom in Kontakt gebracht. Die Chemikalie reagiert mit dem CO₂ und wird in eine separate Prozesseinheit weitergeleitet. Dort wird die gesättigte Substanz erhitzt und gibt dabei das CO₂ wieder ab. Die gereinigte Chemikalie kehrt in den Kontaktturm zurück, während das CO₂ verflüssigt werden kann. Der Nachteil dieses Prozesses liegt vor allem in den beträchtlichen Energiemengen, die bei der Erhitzung der Chemikalie verbraucht werden. Daher würde die Anwendung dieser heute verfügbaren Technologie in Elektrizitätskraftwerken die Kosten für Elektrizität um etwa 50 - 100% erhöhen, wobei 80 - 90% des CO₂ aus dem Abgasstrom herausgefiltert würden.

In einem anderen Prozess wird der fossile Brennstoffträger anstatt in Luft in Sauerstoff verbrannt. Rein theoretisch könnte dabei ein Abgasstrom produziert werden, der zu 100 Prozent aus Kohlendioxid besteht. Das Hauptproblem bei diesem Konzept sind die sehr hohen Verbrennungstemperaturen, denen gegenwärtige Materialien nicht standhalten können.

Wasserstoff kann in einem alternativen Prozess sowohl aus Kohle als auch aus Erdgas hergestellt werden. Der fossile Energieträger wird dabei zunächst entweder

vergast (Kohle) oder partiell oxidiert (Gas). Dadurch entsteht sogenanntes synthetisches Gas. Anstatt nun dieses synthetische Gas - wie üblich - zur Elektrizitätserzeugung zu verfeuern, wird eine Reaktion des aus CO und H₂ zusammengesetzten Gases mit Wasserdampf (H₂O) herbeigeführt, was zur Bildung von H₂ und CO₂ führt. Weil sich das Gas unter hohem Druck befindet, können H₂ und CO₂ mit physikalischen Verfahren kostengünstig voneinander getrennt und der weiteren Verwendung zugeführt werden. Das Resultat ist Wasserstoff sowie flüssiges CO₂, das separat eingelagert werden kann.

Geologische Formationen und Ozeane sind die wichtigsten Alternativen für die Einlagerung von CO₂. Das Potential zur kommerziellen Nutzung von CO₂ ist vernachlässigbar [Herzog et al., 1997]. Möglicherweise können in der Zukunft größere Mengen CO₂ in biochemischen Anlagen wie etwa Mikroalgenplantagen verwendet werden, um Biomasse, Sauerstoff oder pharmazeutische Chemikalien zu produzieren. Allerdings müssen in diesem Bereich noch beträchtliche Forschungsanstrengungen unternommen, um geeignete Mikroalgenkulturen zu finden [Bayless, 2001, Nakamura, 2001].

Mögliche geologische Lagerstätten für Kohlendioxid sind erschöpfte Öl- und Gasfelder, Ölfelder, in die CO₂ zur Erhöhung der Förderquoten injiziert wird, tiefe Kohleschichten sowie salzhaltige Aquifere. Weil ausgebeutete Öl- und Gasfelder bereits über Jahrmillionen flüssige bzw. gasförmige Substanzen unter hohem Druck gespeichert haben, geht man davon aus, dass auch CO₂ sicher und langfristig in ihnen gelagert werden könnte. Allerdings weiß man sehr wenig über leere Öl- und Gasfelder, weil sie bisher nicht von Interesse waren. So könnte z.B. Wassereintrich die Speicherkapazitäten verringert haben. Bisher wurden keine Feldversuche zur Einpressung von CO₂ in erschöpfte Öl- und Gasfelder unternommen, der Prozess ist dem der Injektion von CO₂ in Ölfelder zur Erhöhung der Förderquoten allerdings sehr ähnlich. Dieses Verfahren ist heute weltweit Standardpraxis. Dabei wird, sobald die Ölförderquoten nachlassen, Kohlendioxid in Öllagerstätten eingepresst um die Viskosität des Öles zu erhöhen. Dadurch kann zusätzliches Öl gewonnen werden. Würde man diesen Prozess zur Sequestrierung von Kohlendioxid aus Kraftwerken verwenden, dann könnten die Erlöse für das zusätzlich gefördert Öl als Kosten senkender Faktor für die Sequestrierung des Kohlendioxid betrachtet werden. Analoges gilt für die Einpressung von CO₂ in tiefe Kohleformationen, wenn dabei in den Kohleformationen vorhandenes Erdgas gewonnen werden kann. Bei diesem Pro-

zess verdrängen die Kohlendioxidmoleküle die Erdgasmoleküle aus den Flözen und werden von der Kohleoberfläche absorbiert. Erste Feldprojekte in den USA zeigen vielversprechende Resultate [Stevens et al., 1998].

Salzhaltige Aquifere sind eine weitere Möglichkeit zur Einlagerung von CO₂. Auf der Sleipner Plattform in der Nordsee verpresst Statoil bereits heute 1 Million Tonnen bei der Erdgasförderung anfallendes CO₂ jährlich in eine Aquiferformation unterhalb des Meeresbodens. Damit vermeidet Statoil die Zahlung der norwegischen CO₂-Steuern von umgerechnet 50 US-Dollar pro Tonne emittiertem CO₂.

Mögliche Gefahren der Injektion von CO₂ in geologische Formationen sind unter anderem die Verschmutzung von Trinkwasser und unfallbedingter Austritt von Kohlendioxid an den Injektionsvorrichtungen. Zentraler Faktor bei der Auswahl potentieller Lagerstätten ist außerdem die Integrität des Reservoirs, damit nicht unbemerkt Kohlendioxid durch Risse in den Gesteinsschichten in die Atmosphäre entweichen kann.

Die neben den geologischen Formationen zweite potentielle Deponie für anthropogenes CO₂ sind die Ozeane. Bei der Einlagerung von Kohlendioxid in die Ozeane ist zu berücksichtigen, dass das verklappte CO₂ spätestens nach 1000 Jahren in die Atmosphäre gelangen würde, weil sich die ozeanischen Oberflächen- und Tiefenströmungen in dieser Zeitspanne einmal umwälzen und Weltmeere und Atmosphäre ihren Kohlendioxidgehalt grundsätzlich einander angleichen. Die Idee hinter der Ozeansequestrierung ist also „to buy time“ – die Sequestrierung von Kohlendioxid soll ermöglichen, das Energiesystem ohne Wachstumseinbußen und unter Vermeidung der in business-as-usual Szenarien vorhergesagten atmosphärischen Spitzenkonzentrationen von CO₂ auf emissionsfreie Energiequellen umzustellen.

Zur Deponierung von CO₂ in den Ozean wurden verschiedene technische Konzepte diskutiert, etwa die Verklappung von Schiffen mit Hilfe von Pipelines oder die Injektion von schwimmenden Plattformen in 3000 - 4000 Meter Tiefe. Diese Konzepte sind mit gegenwärtiger Technik allerdings nicht realisierbar. Erwogen wird daher die Injektion von CO₂ durch feine Düsen in ca. 1600 m Tiefe. Dabei soll eine aus kleinen CO₂-Tröpfchen bestehende aufsteigende Kohlendioxidblase von ca. 5 m Durchmesser produziert werden, die sich während ihres Aufstieges mit dem Meerwasser vermischt und dann in eine der ozeanischen Tiefenströmungen gespült wird [Herzog et al., 1997].

Die potentiellen Risiken der Verklappung von Kohlendioxid in den Ozeanen re-

	Erschoepfte Oel- und Gasfelder	Injektion in aktive Oelfelder	Tiefe Kohleschichten	Aquifere	Ozeane
Weltweites Lagerpotential in Gigatonnen Kohlenstoff	180 - 500	17	62	87 - 2700	1400 - 27.000

Abbildung 3.5: Schätzungen weltweiter Lagerpotentiale für anthropogenes CO₂ (Bauer und Flachsland [2002]).

sultieren in erster Linie aus der Senkung des pH-Wertes im Meereswasser. Es existieren nur sehr wenige Untersuchungen über die Auswirkungen auf marine Organismen, und die meisten betroffenen Prozesse sind nicht vollständig verstanden [Freund and Ormerod, 1997]. Sicher ist, dass auch wenn unmittelbares Absterben von marinen Organismen durch angemessene Injektionstechniken vermieden werden könnte, ansteigende CO₂-Konzentrationen und fallende pH-Werte Auswirkungen auf das Verhalten von Mikroorganismen haben [Freund and Ormerod, 1997, Sugimori et al., 2000]. Das Ausmaß, die Qualität und die weiterreichenden Konsequenzen dieser Verhaltensänderungen können nicht vorhergesagt werden. In einem internationalen Feldexperiment vor Hawaii sollten im Sommer 2001 erstmals sowohl die Injektionstechnik als auch die Auswirkungen auf das marine Ökosystem untersucht werden. Das Experiment fand allerdings nicht statt.

Die Schätzungen der weltweiten Lagerpotentiale für Kohlendioxid sollten sehr vorsichtig behandelt werden, da die angewendete Methodologie nicht ausgereift ist und bislang nur wenige Untersuchungen durchgeführt wurden.

Der Beitrag des Geo-Engineerings lässt sich nur schwer abschätzen. Die Sequestrierung von CO₂ im tiefen Ozean ist eine planetarische end-of-pipe Technik, deren langfristige Wirkung unklar ist. Darüber hinaus stößt sie in der Öffentlichkeit und bei Nicht-Regierungsorganisationen auf erhebliche Kritik. Die Sequestrierung von CO₂ in geologischen Formationen könnte sich dagegen als eine wichtige Option „to buy time“ herausstellen. Angesichts der Schwierigkeiten, das ursprüngliche Klimafenster des WBGU zu erreichen, werden Optionen wichtig, die Zeitfenster öffnen für den Umbau des weltweiten Energiesystems.

3.3 Randbedingungen des Energiesystems

3.3.1 Energiesicherheit

Seit dem 11. September 2001 hat die Problematik der Energieversorgung eine erneute Aktualität gewonnen. Die OECD ist in der Versorgung mit Öl, Kohle und Gas abhängig von Staaten, die in einer strategische Ellipse zusammengefasst werden können, und zu der Staaten wie Saudi-Arabien, Iran und Aserbaidschan gehören. Die Abhängigkeit von diesen Staaten stellt für die OECD ein Sicherheitsrisiko dar. Um die Verletzbarkeit der OECD zu verringern, existieren grundsätzlich mehrere Optionen, die sich teilweise mit einer klimapolitischen Vermeidungsstrategie decken:

- Die OECD und vor allem die USA könnten ihre Energieeffizienz steigern
- Ein Übergang zu erneuerbaren Energie und zur Nuklearenergie könnte eingeleitet werden
- Die OECD könnte ihren Bezug fossiler Energie geographisch diversifizieren, indem man versucht, die Explorationstätigkeit außerhalb der strategischen Ellipse zu verstärken.
- Die OECD könnte eine „back-to-coal“ Klimapolitik betreiben.

Nur die beiden ersten Optionen decken sich mit einer präventiven Klimapolitik. Die dritte Option, eine verstärkte Explorationstätigkeit nach fossiler Energie außerhalb der strategischen Ellipse, könnte sich klimapolitisch kontraproduktiv auswirken, ebenso die vierte Option. Die Staaten der strategischen Ellipse verfügen über 70 Prozent der weltweiten Erdölvorkommen und über 60 Prozent der weltweiten Erdgasvorkommen. Ob die Explorationstätigkeit außerhalb der strategischen Ellipse so erfolgreich sein wird, dass die marginalen Förderkosten konstant bleiben werden, ist ungewiß. Die meisten Beobachter, aber auch Unternehmen wie Shell, halten den Umbau des Energiesystems auf regenerative Energien innerhalb der nächsten 50 Jahre nicht für wahrscheinlich. Es ist daher durchaus denkbar, dass jenseits des Jahres 2040 die Kohle wieder einen größeren Anteil an den Primärenergieträgern bekommen wird - sie ist reichlich und kostengünstig vorhanden, aber auch geographisch diversifizierter verteilt. Außerdem lässt sich mit Kohle auch Wasserstoff erzeugen, mit dem billig geheizt und gefahren werden kann. Ob dies freilich klimapolitisch den

gewünschten Nettoeffekt haben wird, bleibt fraglich. Unter dem Gesichtspunkt der Energiesicherheitspolitik hat die Kohle viele Vorteile auf ihrer Seite.

3.3.2 Verfügbarkeit von Ressourcen und Reserven

Die Dringlichkeit eines klimapolitischen Handlungsbedarfs hängt entscheidend von der Verfügbarkeit erschöpfbarer Reserven ab. Dabei kommt es nicht nur auf die Einschätzung der Menge an, sondern auch auf die Abschätzung der Kosten, zu denen Öl, Kohle und Gas extrahiert werden können.

Geht man davon aus, dass etwa 5000 GtC Kohlenstoff in Gestalt von Kohle, Öl und Gas vorhanden sind, werden - business-as-usual vorausgesetzt - bis zum Ende des Jahrhunderts wahrscheinlich 3500 GtC verbrannt werden. Um ein akzeptables Temperaturfenster zu erreichen, dürften nur 500 GtC kumuliertem Kohlenstoff bis zum Jahre 2100 verbraucht werden. Die schiere Menge an vorhandenem Kohlenstoff stellt also keine Schranke dar. Hingegen liegt die Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre bei etwa 500 Gt Kohlenstoff. Damit sind die Senken das Problem, nicht aber die Quellen.

Trotzdem bestimmt der Extraktionssektor den klimapolitischen Handlungsbedarf und auch die klimapolitischen Handlungsmöglichkeiten entscheidend mit. Der klimapolitische Handlungsbedarf ist nämlich um so größer, je billiger fossile Energie vorhanden ist. Die klimapolitischen Handlungsmöglichkeiten sind um so geringer, je billiger fossile Energie vorhanden ist. Denn je billiger fossile Energie ist, um so größer sind die Kosten der Klimapolitik gegenüber einem business-as-usual Pfad, desto größer ist aber auch die Notwendigkeit einer Klimaschutzpolitik. Diese Fragen werden noch ausführlich in Abschnitt 4 diskutiert werden. Um sie überhaupt klären zu können, benötigen wir eine Abschätzung der Extraktionskostenfunktion in Abhängigkeit von der kumulierten Extraktionsmenge.

Die unseres Wissens umfangreichste Untersuchung hierzu hat [Rogner, 1997] vorgelegt. Ausgangspunkt der Überlegungen von Rogner ist die Feststellung, dass aus dem Verhältnis von Reserven zur Produktion schon seit Beginn des Jahrhunderts prognostiziert wird, in den nächsten 20 bis 40 Jahren seien die Bestände an fossiler Energie erschöpft. Tatsächlich hat der technische Fortschritt in der Extraktion beträchtlich zugenommen, so dass Ressourcen in Reserven verwandelt wurden, die nun wirtschaftlich genutzt werden konnten. So geht Rogner in seiner Untersuchung davon aus, dass zur Zeit 1500 GtC kumulierter Kohlenstoff bei annähernd konstanten

Grenzkosten genutzt werden kann. Der technische Fortschritt wird die Grenzkosten der Extraktion jedoch um 1 % pro Jahr senken, so dass die Reserven auf 5000 GtC bis zum Ende des Jahrhunderts ansteigen werden; der IPCC schließt sich dieser Schätzung an [IPCC Working Group III, 2001].

In seiner Schätzung kommt Rogner zu dem Ergebnis, dass 1600 Gtoe konventionelle Kohlenwasserstoffe als Reserve zur Verfügung stehen. Diese Menge ist um das fünffache höher als der kumulierte Verbrauch fossiler Ressourcen seit dem Beginn der Kohleära in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Zur Zeit werden etwa 10 Gtoe Primärenergie pro Jahr verbraucht, auf dieser Basis würde die fossile Ressourcenbasis noch 160 Jahre zur Verfügung stehen. Von diesen 1600 Gtoe stehen etwa 60 % in Form von Kohle zur Verfügung. Die Ressourcen sind etwa um das zweifache höher als die Reserven. Als Summe von Reserven und Ressourcen ergeben sich ca. 5000 Gtoe. Die Unsicherheiten beziehen sich nach Rogner weniger auf die geologische Verfügbarkeit als auf den technischen Fortschritt.

Das Verdienst von Rogner besteht darin, dass er geologische Daten in einem konsistenten ökonomischen Rahmen diskutiert. Damit könnte der Streit zwischen Geologen, denen es um die physische Verfügbarkeit geht und den Ökonomen, die an Nutzungskosten von Kohlenstoff interessiert sind entschärft werden. Die Debatte zwischen Ökonomen und Geologen wird auch durch die unterschiedliche Verwendung der Begriffe Reserven und Ressourcen erschwert. Die in der Geologie übliche Verwendung der McKelvey-Box (siehe Rogner [1997, S. 256]) unterscheidet zwischen Ressourcen und Reserven. Danach sind Reserven das ökonomisch nutzbare Potential von Kohlenstoff, während die Ressourcen sich auf die physische Verfügbarkeit beziehen. Diese Unterscheidung wird in der Ökonomie nicht getroffen. Welches physische Potential überhaupt genutzt werden kann, hängt von den Grenzkosten der Extraktion ab. Wir folgen hier dem ökonomischen Sprachgebrauch und unterscheiden nicht zwischen Reserven und Ressourcen, sondern verwenden eine Funktion (im Anschluß an Rogner), die jeder Einheit Kohlenstoff die entsprechenden Grenzkosten zuordnet. Sollten man aufgrund neuer geologischer Forschung zu einer anderen Einschätzung der Reserven (in der McKelvey Box) kommen, so schlägt sich dies in einer Verschiebung der Funktion nieder.

Da die Unsicherheit über die marginalen Extraktionskosten vergleichsweise [Rogner, 1997, S. 256] hoch ist, werden wir hier Szenarien bei unterschiedlichen Grenzkosten und unterschiedlichen Raten des technischen Fortschritts rechnen. Mit Hilfe

dieser Funktion lassen sich auch die stilisierten Fakten der Emissionen und der Energieverbrauchs gut reproduzieren.

3.4 Schlussfolgerung

Der Umbau des Energiesystems – dies sollte deutlich werden – stellt eine bislang nicht dagewesene historische Herausforderung für die Menschheit dar. Gewiß war der Übergang von der Holz- zur Kohlewirtschaft ein umwelt- und wirtschaftshistorischer Einschnitt ersten Ranges. Die Menschen in Mitteleuropa haben sich der Holzknappheit durch die Nutzung der Kohle „erfolgreich“ angepasst. Auch wir müssen uns anpassen; nur haben wir die Frage zu stellen, ob z.B. die Anpassungsgeschwindigkeiten schnell genug sind. Sind sie nicht schnell genug, um das Klima zu stabilisieren, stellt sich die Frage, wer diese Anpassungsprozesse wie beeinflussen kann. Wir werden hierzu unsere Überlegungen in Abschnitt 5 vorstellen. In einer ersten Abschätzung, kamen wir zu dem Ergebnis, dass Bevölkerungspolitik wenig aussichtsreich ist. Unter Suffizienzstrategie lässt sich verschiedenes verstehen: Versteht man darunter, dass der Pro-Kopf Konsum langfristig nicht steigen kann oder sogar sinken soll, erscheint uns diese Perspektive für die nächsten 50 Jahre als aussichtslos. Versteht man unter Suffizienzstrategie, dass sich langfristig auch die Lebensstile verändern können, dann erscheint uns diese Perspektive als sinnvoll, wenngleich offen bleibt, ob diese Lernprozesse schnell genug ablaufen. Als aussichtsreichste Kandidaten erscheinen uns die drei verbleibenden Optionen der Effizienz- und Substitutionsstrategie sowie des Geo-Engineering. Im nächsten Abschnitt sollen Szenarienrechnungen vorgestellt werden, die für die erste Hälfte des 21. Jahrhunderts gangbare Szenarien zeigen sollen.

Kapitel 4

Szenarienrechnungen

Dieser Abschnitt hat zwei Ziele: Erstens soll der Rahmen unserer Analyse skizziert werden; deshalb werden wir sowohl das für die Szenarienrechnungen verwendete Modell vorstellen, als auch jene Konzepte erläutern, die so noch nicht in endogenen Wachstumsmodellen verwendet wurden. Zweitens werden wir vier Grundszenarien beschreiben und rechnen. Darüber hinaus unternehmen wir den Versuch einer Bewertung, deren Grundlage nicht allein Rechnungen sein können, wenngleich diese unverzichtbar sind. Ökonomen unter den Lesern werden spüren, dass die Energie- und Klimapolitik gewichtige ordnungspolitischen Grundfragen aufwirft.

4.1 Der Rahmen der Analyse

In diesem Abschnitt wollen wir vier grundlegende Szenarien durchrechnen: Im BAU Szenario wird ein optimaler Wachstumspfad der Weltwirtschaft ohne Klimaleitplanken vorgestellt; in diesem Szenario kommt es zu einem Umbau des Energiesystems, allerdings erst im 22. Jahrhundert. Im BAU Szenario könnte es nur dann zu einem raschen Umbau kommen, wenn die fossilen Bestände ökonomisch knapp werden sollten: Würden die Extraktionskosten bei ca. 1500 Gt Kohlenstoff rasch ansteigen, käme es zu einem Umbau des Energiesystems, der durchaus mit klimapolitischen Vorgaben vereinbar wäre. In einem zweiten Szenario zeigen wir, dass ein UmBAU des Energiesystems durchaus möglich ist, das gegenüber dem BAU Szenario zu keinen dramatischen Wohlfahrtsverlusten führen würde. Allerdings hängt dieses Ergebnis entscheidend davon ab, wie in den nächsten Jahrzehnten Lerneffekte bei den erneuerbaren Energien realisiert werden können. In einem dritten Szenario (EFFIZIENZ)

analysieren wir, ob durch eine bloße Effizienzsteigerung des fossilen Energiesystems Klimaschutz ohne gravierende Wachstumseinbußen möglich ist. Im vierten und letzten Szenario (BAU+END-OF-PIPE) stellen wir uns die Frage, welche Rolle das Geoeengineering spielen könnte. Dieses letzte Szenario dient als vorbereitender Schritt, diese Option vollständig in den hier vorgeschlagenen Modellrahmen zu integrieren.

Die leitende Frage dieser vier Grundszenarien ist, wie die Optionen der BAUER-KAYA-Identität kombiniert werden müssen, damit das Klimaschutzziel möglichst ohne große Wachstumseinbußen realisiert werden kann. Bereits im letzten Abschnitt hatten wir begründet, warum Bevölkerungspolitik und Suffizienz nicht weiter betrachtet werden sollen. In unserem Modell MIND haben wir die Suffizienzstrategie keineswegs ausgeschlossen, es wird sich aber zeigen, dass diese nicht optimal ist. Aus der Vielzahl der möglichen Pfade wurde jener ausgewählt, der einer bestimmten Bewertungsfunktion genügte. Als Bewertungsfunktion haben wir den Nutzen angesetzt, den der Haushaltssektor aus dem Pro-Kopf-Konsum bezieht. Diese Annahme ist zugegebenermaßen sehr konservativ; es ging uns aber darum zu zeigen, welche klima- und wachstumspolitischen Optionen sich unter dieser Annahme ergeben. Dies schließt keineswegs aus, dass die Haushalte im Laufe der Zeit nicht eine stärkere Präferenz für Umwelt entwickeln können; unter dieser Voraussetzung würde sich der Zielkonflikt zwischen Wachstum und Umwelt weiter entspannen. Kann gezeigt werden, dass sich dieser Zielkonflikt auch dann entschärfen lässt, wenn der Haushaltssektor keine anderen Ziele verfolgt als die Maximierung seines Pro-Kopf-Konsums, dann erhalten die ökonomischen Argumente für den Klimaschutz ein besonderes Gewicht.

Die Vereinfachung auf vier Grundszenarien bedarf der Erläuterung vor dem Hintergrund der SRES Szenarien [Nakićenović and Swart, 2000].¹ Die SRES Szenarien sind für die hier vorgestellten Szenarien zunächst eine „benchmark“. Der Leser wird feststellen, dass sich auch unsere Szenarien in diesem Rahmen bewegen. Unsere Szenarienrechnungen beziehen sich auf die Einheit „Welt“; um die gesamte Bandbreite von SRES zu reproduzieren, müssten wir eine regionale Auflösung unseres Modells zur Verfügung haben. Dies ist im Augenblick noch nicht der Fall. In diesem Sinne ist unsere Analyse enger; in einem anderen Sinne ist jedoch unsere Analyse allgemeiner: wir versuchen die ökonomische Dynamik verständlich zu machen, die die Transformation des weltweiten Energiesystems vorantreiben kann. Darüber hinaus identifi-

¹eine hervorragende Übersicht liefert Fuentes [2000]

zieren wir die kritischen Annahmen und Parameter, die über die Vorzugswürdigkeit der untersuchten Szenarien entscheiden.

4.1.1 Das Modell MIND

Aufgabe des Modells

MIND steht für *Model of Investment and Technological Development*. Mit Hilfe dieses Modells sollen langfristige Handlungsoptionen für den Klimaschutz bewertet werden. MIND ist ein globales Modell, d.h. es gibt nur eine Weltregion. Das Modell dient als Grundlage für grundlegende, langfristige und globale Planungen und Entscheidungen hinsichtlich Investitionen und technologischer Entwicklung mit einem besonderen Fokus auf Energiesysteme. Die Stärken des Modells liegen in der Verbindung von dynamischer Optimierung, endogenem technischem Wandel, Abbildung mehrerer Sektoren mit heterogenem Kapitalstock, der Berücksichtigung fossiler Rohstoffe und der Koppelung mit einem Klimamodell. Darüber hinaus ist MIND in der Lage, die stilisierten Fakten des wirtschaftlichen Wachstums abzubilden.

MIND basiert auf einem Ramsey Modell des optimalen Wachstums. Frank Ramsey stellte in einem Aufsatz 1928 die Frage, wieviel eine Gesellschaft sparen (und in Kapital investieren) sollte, um ein gesellschaftliches Optimum zu erreichen, das sich aus dem intertemporalen Nutzen des Konsums ergibt. Offensichtlich schränken Ersparnisse in der Gegenwart den Konsum ein, erhöhen aber zugleich die Produktions- und Konsummöglichkeiten in der Zukunft. Der Interessengegensatz zwischen gegenwärtigem und zukünftigem Konsum wird mittels der intertemporalen Optimierung gelöst. Das Ergebnis ist ein optimaler Plan für die Ersparnisse - und damit der Investitionen.

Entscheidend für die Interpretation von Modellen des optimalen Wachstums ist die Vorstellung eines sozialen Planers, der eine aggregierte Wohlfahrtsfunktion unter bestimmten Nebenbedingungen maximiert. Die Verwendung von aggregierten Wohlfahrtsfunktionen ist seit der Veröffentlichung des Arrows'schen Unmöglichkeitssparadoxons umstritten, da unter bestimmten Voraussetzungen (z.B. non-dictatorship) eine Aggregation individueller Nutzen nicht widerspruchsfrei möglich ist. Die Diskussion der Voraussetzungen, die zur Unmöglichkeit der Aggregation führen, müssen hier nicht erläutert und diskutiert werden, denn alle Annahmen werfen im Kontext *intergenerationeller* Gerechtigkeit spezifische Schwierigkeiten auf: Es muss für Men-

schen entschieden werden, die noch gar nicht geboren sind und daher noch keine Präferenzen haben können. Der soziale Planer ist in diesem Kontext eine Hilfskonstruktion, die kommenden Generationen überhaupt zu repräsentieren [Edenhofer, 1996a, Edenhofer and Rohner, 1996b]. Über die Art der Repräsentation lässt sich natürlich streiten. In der vorliegenden Version von MIND wird eine einfache gesellschaftliche Wohlfahrtsfunktion verwendet, die in der wachstumstheoretischen Diskussion verarbeitet ist [Barro and Sala-I-Martin, 1995].

Die Idee Ramseys wurde von vielen Autoren auf die Klimaproblematik angewendet. So haben Nordhaus and Boyer [2000] im Modell DICE neben den Ersparnissen die kostenverursachende Vermeidung von CO₂-Emissionen, die durch Produktion von Gütern entstehen, als weitere Steuergröße eingeführt. Ein durch die Emissionen verändertes Klima verursacht wiederum Schäden in der Produktion. Dadurch ist es möglich, die heutigen Kosten der CO₂-Emissionsvermeidung gegen die späteren Nutzen geringerer Klimaschäden aufzurechnen und so eine optimale Klimaschutzstrategie zu berechnen. Der Vorzug hochaggregierter Modelle wie DICE, langfristig optimale Klimaschutzstrategien zu formulieren wird durch den Nachteil aufgewogen, der durch die Verwendung von Vermeidungskostenfunktionen und der Annahme eines exogenen technischen Fortschritts entsteht. Die Vermeidungskosten werden nämlich wesentlich durch den technischen Fortschritt im Energiesystem bestimmt. Erst das Verständnis dieser Dynamik erlaubt eine Einschätzung dynamischer Vermeidungskostenfunktionen.

Daher wird in MIND diese Dynamik explizit modelliert - mit Ergebnissen, die in nicht-trivialer Weise von herkömmlichen Wachstumsmodellen abweichen. MIND erlaubt es, eine optimale Investitionspolitik als eine Kombination und zeitliche Abfolge von Einzelstrategien zu berechnen. Das Modell besteht aus verschiedenen Modulen, die nachfolgend beschrieben werden.

Das Modul Haushalt

Die Zielfunktion des Haushaltes dient als Bewertungsfunktion für alternative Investitionsentscheidungen. Ein globaler Investor wählt die Alternativen so aus, dass die Zielfunktion des Haushaltes maximiert wird. Der zu maximierende Zielfunktionswert ist die intertemporale Wohlfahrt W . Sie wird berechnet durch das Integral des mit ρ diskontierten Periodennutzens über den Planungshorizont (τ_1, τ_2) , der von 1995 bis 2300 geht. Der Periodennutzen ist der natürliche Logarithmus des Pro-Kopf-

Konsums C/L multipliziert mit der Bevölkerung L .

$$W = \int_{\tau_1}^{\tau_2} e^{-\rho t} L(t) \ln \frac{C(t)}{L(t)} dt, \quad W \in \mathbb{R}. \quad (4.1)$$

Der Zielfunktionswert W soll unter Nebenbedingungen durch die Wahl der Steuerungsvariablen maximiert werden. Die einzige freie Variable in 4.1 ist C , da L durch ein exogenes Szenario nach SRES B2 vorgegeben wird. Der Haushaltssektor steuert also nur die Investitionen, nicht aber das Arbeitsangebot. Die Haushalte bieten ihre Arbeit unabhängig von Reallohn an; Arbeits- und Freizeit werden in diesem Modell nicht endogen bestimmt.

Die Steuerungsvariablen sind Investitionen, die sich in zwei Gruppen einteilen lassen: (1) Investitionen in physisches Kapital I_m und (2) Investitionen in Research-and-Development RD_n . Diese Investitionen haben Einfluß auf die Zustandsvariablen. Es gibt vier verschieden Arten von Zustandsvariablen: (a) Bestände von physischem Kapital, (b) Bestände von Wissenskapital, (c) die kumulierte Ressourcenentnahme und (d) die Konzentration von Klimagasen in der Atmosphäre. Die Investitionen in physisches Kapital haben über Lerneffekte auch Einfluß auf das Wissenskapital. Die Investitionsentscheidungen beeinflussen den Zustand der Atmosphäre; dieser Einfluß wird im Klimamodul noch genauer spezifiziert. Die Steuerungsvariablen sind Flussgrößen, die die Zustandsvariablen (Bestandsgrößen) beeinflussen. Diese wiederum beeinflussen die zustandsabhängigen Variablen. Das sind solche, deren Höhe von den Zustandsvariablen abhängen, die selbst aber Flussgrößen sind (Bruttonationalprodukt, Energie, Ressourcenextraktion und Emissionen). Die zustandsabhängigen Variablen hängen über die Zustandsvariablen von den Steuervariablen ab, die wiederum durch die zustandsabhängigen Variablen in jedem Zeitpunkt beschränkt werden. Alle Steuerungsvariablen, die zustandsabhängige Variable Bruttonationalprodukt Y und C tauchen in der zustandsabhängigen Budgetrestriktion 4.2 auf, die immer erfüllt sein muss.

$$Y(t) \geq C(t) + \sum_m I_m(t) + \sum_n RD_n(t), \quad \forall t. \quad (4.2)$$

Wegen des Ungleichheitszeichens \geq muss die Budgetrestriktion nicht immer voll ausgeschöpft werden. In diesem Falle wäre das Konsumgut nicht knapp und sein Preis wäre Null.

Das Modul aggregierte Produktion

Die Wirtschaft wird durch eine makroökonomische Produktionsfunktion charakterisiert. Für die Produktion des aggregierten Gutes Y - dem Bruttosozialprodukt - werden drei Produktionsfaktoren benötigt: Arbeit L , Kapital K_A und Energie E . Die Produktionsfunktion ist vom CES-Typ. Die konstante Substitutionselastizität σ_A geht in diese Funktion über den Parameter ρ_A ein. Beide stehen über die Definition $\sigma_A = 1/(\rho_A - 1)$ in Beziehung zueinander. In MIND wird die Substitutionselastizität auf 0.5 gesetzt. Damit ist implizit vorausgesetzt, dass die Produktionsfaktoren nicht beliebig gegeneinander substituierbar werden können. So wird eine Mindestmenge an Energie benötigt, damit überhaupt Produktion möglich ist. Über den Parameter Φ_A wird die Funktion so skaliert, dass der Output und die Kombination der Inputs die gleiche Dimension haben. Das relative Gewicht der Produktionsfaktoren wird über die Parameter ξ_A^L , $\xi_A^{K_A}$ und ξ_A^E bestimmt; die Parameter ξ werden häufig Verteilungsparameter genannt. A und B sind die Effizienzparameter für Arbeit und Energie, die durch Investitionen in R&D verbessert werden können; sie rechnen die Produktionsfaktoren L und E in Effizienzeinheiten um.

$$Y = \Phi_A [\xi_A^L (A * L)^{-\rho_A} + \xi_A^E (B * E)^{-\rho_A} + \xi_A^{K_A} K_A^{-\rho_A}]^{-\frac{1}{\rho_A}} \quad (4.3)$$

Über A und B wird die Höhe des technischen Fortschritts und seine Richtung bestimmt. Damit kann die im Wachstumsprozess steigende Energienachfrage durch erhöhte Energieproduktion oder durch steigende Energieproduktivität befriedigt werden. Wenn beide Alternativen nur beschränkt möglich sind, müssen Energieeffizienzeinheiten durch Arbeitseffizienzeinheiten oder Kapital substituiert werden. In einem solchen Falle beginnen die Mechanismen der CES-Produktionsfunktion zu greifen: Über veränderte Faktorpreisrelationen wird es auf Kosten von Arbeit und Kapital zu einer Erhöhung der Einkommensquote von Energie kommen. Der soziale Planer (oder der Haushalt) hat also die Aufgabe, die Dynamik von A und B endogen zu bestimmen.

$$\dot{K}_A(t) = I_A(t) - \delta_A^K K_A(t), \quad K_A(t = \tau_1) = K_A^0. \quad (4.4)$$

Die Kapitalakkumulation (siehe Gleichung 4.4) wird in MIND wie in der Wachstumstheorie üblich beschrieben: Dabei sind I_A die Investitionen und δ_A^K die Abschreibungsrate; \dot{K}_A bezeichnet die Veränderung des Kapitalbestandes in der Zeit, der Kapitalbestand K_A^0 steht am Beginn der Planungsperiode zur Verfügung.

Das Modul Forschung und Entwicklung

Die R&D-Sektoren haben die Aufgabe, die Effizienz der Produktionsfaktoren Arbeit und Energie zu erhöhen. Beide haben die gleiche funktionale Form. R&D Aufwendungen RD_n mit $n = A, B$ erhöhen das Wissenskapital für die Verwendung von Arbeit A und Energie B . Die Mittel werden aus der Budgetgleichung 4.2 aufgebracht.

$$\begin{aligned}\dot{A}(t) &= (\alpha_A RD_A(t)^{\gamma_A} - \delta_A^{RD}) A(t)^{\beta_A}, & A(t = \tau_1) &= A^0; \\ \dot{B}(t) &= (\alpha_B RD_B(t)^{\gamma_B} - \delta_B^{RD}) B(t)^{\beta_B}, & B(t = \tau_1) &= B^0.\end{aligned}\tag{4.5}$$

Die Produktivität der R&D Ausgaben 4.5 wird durch α_n angegeben. Der Parameter δ_n^{RD} gibt exogene Veränderungen in der Zeit an; falls δ_n^{RD} größer Null handelt es sich um Vergessen, falls δ_n^{RD} kleiner Null handelt es sich um exogenen Fortschritt. Die Parameter γ_n und β_n geben Spillover Effekte an. R&D Ausgaben haben zu jeder Zeit eine abnehmende Grenzproduktivität, was durch die Höhe von γ_n mit $0 \leq \gamma_n \leq 1$ angegeben wird. Den Effekt bezeichnet man als *stepping on toes*² und erfasst die negativen Effekte von Doppelarbeiten in verschiedenen Forschungszentren, Rückgriff auf unproduktiveres Personal und ruinöse Patentwettläufe. Der zweite Effekt bezieht sich auf intertemporale Spillovers. Die Entwicklung des Wissenskapitals hat über die Zeit hinweg Einfluß auf die Produktivität der R&D Ausgaben und wird durch die Höhe von β_n mit $0 \leq \beta_n \leq 1$ beschrieben. Diesen Effekt kann man durch die Metapher des *standing on shoulders*³ veranschaulichen. Das soll heißen, dass Wissen über die Zeit nicht verloren geht, sofern $\beta_n > 0$ gilt. Es wird aber - gemessen an den R&D Ausgaben - immer schwieriger, den bereits vorhandenen Wissenskapitalstock durch neues Wissen zu erhöhen, sofern $\beta_n < 1$ gilt.

Die Erhöhung der Produktivität der Faktoren Arbeit und Energie erfordert Mittel aus dem Sozialprodukt. Die Aufwendungen für die beiden R&D-Sektoren sind in ihrer Aufteilung und Gesamthöhe variabel. In MIND werden die sozialen Renditen dieser Forschungsinvestitionen berechnet, da hier die intertemporalen spill-over Effekte internalisiert werden. Die Fähigkeit des institutionellen Investors (oder sozialen Planers) die intertemporalen spill-over Effekte zu internalisieren, kann durch

²zu deutsch: *sich gegenseitig auf den Füßen stehen*.

³Das geht auf den berühmten Ausspruch von Isaak Newton zurück, der sagte er stünde *auf den Schultern von Giganten*.

den Parameter β_n exogen gelegt werden. Es ist nicht unplausibel davon auszugehen, dass private Firmen die intertemporalen spill-over Effekte nicht internalisieren. Die Investitionen in Forschungs- und Entwicklung werden daher hinter dem gesellschaftlich optimalen Niveau zurückbleiben. Methodisch bleibt es unbefriedigend, den Unterschied zwischen sozialem Planer und privatem Investor parametrisch zu steuern. Methodisch befriedigend wäre es ein Modell, das Firmen explizit modelliert und vergleicht mit den Ergebnissen des sozialen Planers. Da es uns um die Beschreibung optimaler Pfade geht, stellen wir diese Frage in diesem Bericht zurück.

Das Modul Energie

Eine wesentliche Eigenschaft von MIND ist die explizite Modellierung der Produktion von Energie. Dadurch erhält MIND den Charakter eines *vertikalen* Mehrsektorenmodells, da diese Energie in vorgelagerten Produktionsstufen erzeugt wird. Da es zwei alternative Möglichkeiten zur Energieproduktion gibt, ist MIND darüber hinaus ein *horizontales* Mehrsektorenmodell. Durch die horizontale Auflösung verfügt die Ökonomie über Alternativen zur Lösung des Energieproblems.

Das Energieangebot muss der Energienachfrage entsprechen; diese Restriktion muss zu jedem Zeitpunkt erfüllt sein. Dabei bezeichnen E_{fos} und E_{ren} das Energieangebot aus fossilen und erneuerbaren Quellen:

$$E(t) \geq E_{fos}(t) + E_{ren}(t), \quad \forall t. \quad (4.6)$$

Wir werden zunächst den fossilen Energiesektor und dann den erneuerbaren Energiesektor beschreiben, um folgend zum fossilen Ressourcensektor überzugehen.

Für die Produktion fossiler Energie E_{fos} werden fossile Ressourcen R_{fos} und Kapital K_{fos} benötigt. Im fossilen Energiesektor gibt es keinen technischen Fortschritt; der Produktionsprozeß ist durch eine CES-Produktionsfunktion und eine Kapitalbewegungsgleichung repräsentiert. Die Parameter sind analog zu Gleichung 4.3 zu verstehen.

$$E_{fos} = \Phi_{fos} [\xi_{fos}^R R_{fos}^{-\rho_{fos}} + \xi_{fos}^K K_{fos}^{-\rho_{fos}}]^{-\frac{1}{\rho_{fos}}}; \quad (4.7)$$

$$\dot{K}_{fos}(t) = I_{fos}(t) - \delta_{fos}^K K_{fos}(t), \quad K_{fos}(t = \tau_1) = K_{fos}^0. \quad (4.8)$$

Für die Produktion von Energie aus regenerativen Quellen E_{ren} wird nur Kapital K_{ren} benötigt. Die Kapitalbestände haben, in Abhängigkeit von ihrem

Erstellungszeitpunkt, verschiedene Produktivitäten. Wenn in \tilde{t} die Menge Kapital $K_{ren}(\tilde{t})$ mit der Produktivität $\kappa_{ren}(\tilde{t})$ produziert wurde, dann kann damit $E_{ren}(\tilde{t}) = \kappa_{ren}(\tilde{t})K_{ren}(\tilde{t})$ produziert werden. Für die Energieproduktion in t muss weiter berücksichtigt werden, dass zum Zeitpunkt t nur noch ein Anteil von $\omega_{ren}(t-\tilde{t})$ des in \tilde{t} investierten Kapitals wegen der Abschreibungen vorhanden ist:

$$E_{ren}(t) = \int_{\tau_0}^t \omega_{ren}(t-t') \kappa_{ren}(t') K_{ren}(t') dt'. \quad (4.9)$$

Der technische Fortschritt im erneuerbaren Energiesektor ist in Kapitalgütern verkörpert (*embodied technological change*). Der Kapitalbestand in jeder Periode besteht aus verschiedenen *Jahresgängen*; jeder Jahrgang hat eine bestimmte Produktivität: Je jünger das Kapitalgut, um so höher die Produktivität. Sind die Anlagen zur Energieerzeugung aus regenerativen Quellen wie Windkraftanlagen und Solaranlagen erst einmal gebaut, lassen sich ihre technische Eigenschaften nicht mehr verändern. So ist es ökonomisch plausibel, dass die Lernkurveneffekte nur dem jeweils jüngsten Jahrgang zugute kommt. Im Bereich der fossilen Rohstoffextraktion scheint die Verwendung eines Modells mit Jahrgangsmodellen nicht geboten, da es vielmehr das Rohstoffdargebots ist, das die Kapitalproduktivität bestimmt, und nicht der Zeitpunkt der Erstellung der Anlagen.

Die Variable κ_{ren} verändert sich endogen in Abhängigkeit von der Energieproduktion im regenerativen Energiesektor. Dabei wird eine Lernkurve angenommen, die im Abschnitt 4.1.3 genauer erläutert wird. Hier wird lediglich die funktionale Form wiedergegeben.

$$\begin{aligned} \dot{\kappa}_{ren}(t) &= \frac{\kappa_{ren}(t)}{\tau \kappa_{ren}^{max}} (\kappa_{ren}^{max} - \kappa_{ren}(t)) \left(\frac{E_{ren}(t)}{E_{ren}^0} - 1 \right)^{\beta_{ren}}, \\ \kappa_{ren}(t = \tau_1) &= \kappa_{ren}^0. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Wir sind in dieser Version von MIND davon ausgegangen, dass bei der Nutzung erneuerbarer Energien die nicht-produzierten Produktionsfaktoren wie Arbeit und Boden keine limitierenden Faktoren sind. Selbstverständlich kann vor allem Boden ein limitierender Faktor werden. Wir gehen jedoch davon aus, dass es ausreichend bodenvermehrenden Fortschritt gibt, um diese Knappheit zu kompensieren. Für den Zeitraum der nächsten hundert Jahre dürfte sich diese Annahme rechtfertigen lassen. Dies erfordert wie bereits in Abschnitt 3.2.4 dargelegt noch weiterer Forschung.

Der fossile Ressourcensektor benötigt Kapital K_{res} und fördert die fossilen Ressourcen R_{fos} , die vom fossilen Energiesektor benötigt werden. Auch im fossilen Ressourcensektor können Lerneffekte bei der Extraktion auftreten, zugleich steigen jedoch die Grenzkosten der Extraktion mit zunehmender Knappheit fossiler Ressourcen. Neben dem Lerneffekt $\kappa_{res,l}$ gibt es einen Verknappungseffekt $\kappa_{res,k}$; während ersterer die Kapitalproduktivität κ_{res} erhöht, wird er von letzterem vermindert. Das hat zur Folge, dass im fossilen Ressourcensektor auch die kumulierte Ressourcenextraktion berücksichtigt werden muss. So wird der fossile Ressourcensektor charakterisiert durch eine Produktionsfunktion 4.11, eine Lernfunktion 4.12, eine Funktion, die die Ressourcenverknappung beschreibt 4.15, einer Gleichung für die kumulierte Ressourcenextraktion 4.16 /4.17 und einer Kapitalbewegungsgleichung 4.19/ 4.20:

$$R_{fos} = \kappa_{res} K_{res}, \quad (4.11)$$

$$\kappa_{res} = \kappa_{res,l} \kappa_{res,k}, \quad (4.12)$$

$$\dot{\kappa}_{res,l}(t) = \frac{\kappa_{res,l}(t)}{\tau \kappa_{res,l}^{max}} (\kappa_{res,l}^{max} - \kappa_{res,l}(t)) \left(\frac{E_{res}(t)}{E_{res}^0} - 1 \right)^{\beta_{res}}, \quad (4.13)$$

$$\kappa_{res,l}(t = \tau_1) = \kappa_{res,l}^0, \quad (4.14)$$

$$\kappa_{res,k} = \frac{1}{MC_{fos}}, \quad (4.15)$$

$$MC_{fos} = 1 + \frac{\chi_2}{\chi_1} \left(\frac{CR_{fos}}{\chi_3} \right)^{\chi_4}, \quad (4.16)$$

$$\dot{CR}_{fos}(t) = \int_{\tau_1}^t R_{fos}(t') dt', \quad (4.17)$$

$$CR_{fos}(t = \tau_1) = 0, \quad (4.18)$$

$$\dot{K}_{res} = I_{res} - \delta_{res}^K K_{res}, \quad (4.19)$$

$$K_{res}(t = \tau_1) = K_{res}^0. \quad (4.20)$$

Die Erhöhung der Produktivität etwa im Bergbau durch ständig verbesserte Routinen ist ökonomisch durchaus plausibel. Ökonomisch plausibel sind ebenfalls die mit

steigender Extraktionsmenge zunehmenden Grenzkosten. Es werden ja zunächst die Lagerstätten abgetragen, zu denen man am leichtesten den Zugang findet; erst nach und nach wird auf immer schwerer zugängliche Lagerstätten zurückgegriffen. Dies gilt auch für die Wahl der Energieträger: Auch hier werden zunächst jene genutzt, die energetisch die günstigsten Eigenschaften aufweisen.⁴ Diese vereinfachende Annahme erlaubt es, dass wir nicht nach Kohle, Öl und Gas unterschieden müssen, sondern eine aggregierte Größe fossile Energieträger verwendet können.

Darüber hinaus werden in MIND die SO₂-Emissionen berechnet. Sie hängen über einen Umrechnungsfaktor von den CO₂-Emissionen ab, der im Zeitablauf sinkt. Das kann durch vermehrte Umweltschutzbemühungen auf regionaler Ebene gerechtfertigt werden.

Das Modul Klima

Die Veränderung des Klimas - repräsentiert durch die Globale Mitteltemperatur GMT - wird durch die Emissionen von Treibhausgasen verursacht, die im Falle von CO₂ und SO₂ direkt durch die Extraktion fossiler Energieträger bestimmt werden, und im Falle der übrigen Treibhausgase exogen vorgegeben sind. Die CO₂ Emissionen akkumulieren in der Atmosphäre; die SO₂-Emissionen werden innerhalb kurzer Zeit abgebaut. Das Modell des Kohlenstoffkreislaufs für die Akkumulation von CO₂ hat die Eigenschaft, dass das vor-industrielle Konzentrationsniveau nicht wieder erreicht wird; d.h. von den Emissionen seit der Industrialisierung wird auch nach tausend Jahren noch etwas in der Atmosphäre zu finden sein. Die CO₂- und SO₂-Konzentration bestimmt zusammen mit den anderen Treibhausgasen das Strahlungsantrieb, das seinerseits die GMT beeinflusst. Das Verhalten des Kohlenstoff- und des Klimamodells wurde im gegebenen Rahmen an den IPCC TAR, WG1 angepaßt. Die detaillierte Beschreibung des Modells findet sich in Anhang B. An die Klimavariablen können die Leitplanken angelegt werden, die durch WBGU-Fenster oder sonstige vorgegeben sind.

⁴Gegen diese Argumentation kann aus geophysikalischer Sicht der Einwand vorgetragen werden, dass tiefliegende und damit schwer zugängliche Lagerstätten gerade die ältesten sind, und somit Energieträger höherer Qualität beherbergen. Durch Bewegungen der Erdkruste sind aber gleichzeitig Lagerstätten praktisch ans Tageslicht gehoben worden, so dass beispielsweise Kohle im Tagebau abgebaut werden kann. Das entkäftet die Gegenargumentation.

4.1.2 Das Optimierungsproblem

Das Planungsproblem des Haushaltes bzw. des institutionellen Investors besteht nun darin, die Steuervariablen so zu wählen, dass der resultierende Konsumstrom die gesellschaftliche Wohlfahrtsfunktion maximiert. Der Konsum ist der Teil des Sozialproduktes, der nicht für die Steuergrößen verwendet wird. Die Steuergrößen sind:

1. *Investitionen in physisches Kapital* des:
 - (a) aggregierten Produktionssektors,
 - (b) fossilen Energiesektors,
 - (c) fossilen Extraktionssektors,
 - (d) erneuerbaren Energiesektors.

2. *Investitionen in Wissenskapital* zur Verbesserung der:
 - (a) Energieproduktivität,
 - (b) Arbeitsproduktivität.

Damit lassen sich nun optimale Strategien beschreiben, deren Ergebnis sich an der KAYA-Identität ablesen lässt:

1. *Suffizienzstrategie*: Bei einer hinreichend harten Leitplanke müssen Investitionen in den aggregierten Produktionssektor ebenso vermindert werden wie die Investitionen in die Verbesserung der Arbeitsproduktivität, da die CO₂-Emissionen eines fossil basierten Energiesystems limitierend auf das Wachstum wirken.
2. *Effizienzstrategie*: Der Planer kann die Energieproduktivität durch vermehrte Investitionen erhöhen; dadurch kann die vorhandene Energie effizienter genutzt werden und es wird weniger CO₂ emittiert.
3. *Substitutionsstrategie*:
 - (a) *Weniger fossile Energieträger*: Fossile Energieträger können in begrenztem Maße durch Kapital ersetzt werden. Ebenso kann Energie im aggregierten Produktionssektor durch Arbeit und Kapital ersetzt werden. Das Energiesystem bleibt aber fossil basiert.

- (b) *Umbau des Energiesystems*: Die Investitionen im Energiesektor werden zugunsten der erneuerbaren Energietechnologie umgelenkt.

MIND errechnet eine optimale Kombination und eine optimale zeitliche Abfolge dieser Strategien; die Strategie des Geo-engineerings ist bislang noch nicht explizit modelliert; dies soll aber in späteren Versionen geschehen.

Die Verwendung von intertemporalen Optimierungsmodellen im Rahmen der Politikberatung bedarf einiger qualifizierender Bemerkungen. Die Figur des sozialen Planers wird verwendet, um eines oder mehrere soziale Optima abzuleiten. Im Kontext von MIND könnte man sich den sozialen Planer als einen Investitionsfond vorstellen, der vollständig im Besitz der Haushalte ist. Der Investitionsfond wiederum besitzt die entsprechenden Firmen, die nach Maßgabe des sozialen Optimums produzieren. Die sich daraus ergebenden Schattenpreise zeigen die gesellschaftliche Knappheit von Gütern und Produktionsfaktoren. Dabei werden aber auch die gesellschaftliche Knappheiten berechnet, die sich aus den Klimaleitplanken ergeben. Ökonomisch sind Klimaleitplanken nichts anderes als die Definition von Eigentumsrechten an der Nutzung der Atmosphäre. Der Wert dieser Eigentumsrechte ergibt sich daraus, wie eng die Klimaleitplanken gezogen werden. Die sich daraus ergebenden Schattenpreise der Emissionen haben unmittelbare Auswirkungen auf die anderen Schattenpreise des Systems. Anders ausgedrückt: dadurch entstehen neue gesellschaftliche Knappheiten, denen die Investitions- und Sparpolitik Rechnung tragen muss.

Die Berechnung eines sozialen Optimums (oder auch mehrere Optima) ist ein notwendiger Maßstab, um zu prüfen, inwieweit dezentrale Märkte dieses erreichen. Sollten Märkte dieses Optimum verfehlen, so besteht die Notwendigkeit wirtschaftspolitischer Eingriffe oder anderer Verhaltensänderungen. Die Figur des sozialen Planers drückt damit keineswegs eine Präferenz für bürokratische Planung aus, sondern ist schlicht ein Bewertungsmaßstab für die Beurteilung des Ergebnisses von dezentralen Lösungen wie Märkten und Verhandlungen.

In diesem Sinne ist auch MIND ein normatives Modell, das Indikatoren ableitet, z.B. wie schnell etwa ein Strukturwandel forciert werden sollte, um etwa bestimmte Klimaleitplanken einzuhalten und dennoch den Pro-Kopf Konsum in der Zeit zu optimieren. Aber auch für MIND lassen sich institutionelle dezentrale Lösungen denken. Freilich lassen sich die sozialen Optima durch mehrere dezentrale institutionelle Arrangements verwirklichen. Hier realistische Varianten zu identifizieren und

zu modellieren ist eine Herausforderung der Forschung.

4.1.3 Die Endogenisierung des technischen Fortschritts - das Lernkurvenkonzept

Die Endogenisierung des technischen Fortschritts erfolgt in MIND auf zwei Weisen. Erstens wird die zeitliche Dynamik der Effizienzparameter für Arbeit und Energie endogenisiert. Dies geschieht dadurch, dass diese abhängig gemacht werden von den Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen, die wiederum endogen bestimmt werden. Zweitens werden für die erneuerbaren und fossilen Energien Lernkurven eingeführt. Die Endogenisierung der Effizienzparameter haben wir im Anschluß an Jones and Williams [1997] und Aghion and Howitt [1997] entwickelt. Neu gegenüber den endogenen Wachstumsmodellen ist, dass wir nicht nur den Produktionsfaktor Arbeit, sondern auch den Produktionsfaktor Energie betrachten. Diese Diskussion wurde bereits unter dem Stichwort „bias of technological change“ in der Literatur ausführlich diskutiert [Ruttan, 2000, Kennedy, 1964]. Im Anhang zu diesem Bericht haben wir diese Diskussion kurz skizziert und stellen darauf aufbauend unseren Modellierungsvorschlag vor. Die Einführung von Lernkurven hat sich für den erneuerbaren und den fossilen Energiesektor als zentral herausgestellt. Wir werden die Problematik daher in diesem Abschnitt ausführlich diskutieren.

Ein Kernstück des Modell MINDs ist die Beschreibung von Rationalisierungs- und Lerneffekten durch wachsende Produktionsmengen (*steigende Skalenerträge*) bei der Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen und im eingeschränkten Maße auch bei der Extraktion fossiler Ressourcen. Die Energieproduktion E_{ren} aus erneuerbaren Quellen und die geförderten Ressourcen R_{ext} im fossilen Extraktionssektor werden jeweils durch linear-limitationale Produktionsfunktionen beschrieben. Wenn wir den Kapitalstock im erneuerbaren Energiesektor (Extraktionssektor) mit K_{ren} (K_{ext}) bezeichnen, so gilt:

$$\begin{aligned} E_{ren}(t) &= \kappa_{ren}(E_{ren}[t_o, t], t) \cdot K_{ren}(t) \\ R_{ext}(t) &= \kappa_{ext}(R_{ext}[t_o, t], t) \cdot \mu_{ext}(\widehat{R}_{ext}) \cdot K_{ext}(t) \end{aligned}$$

In diesem Modellrahmen werden steigende Skalenerträge durch ein Anwachsen der Produktivität κ beschrieben. Die Produktivität soll steigen, wenn vermehrt erneuerbare Energie erzeugt oder fossile Energie extrahiert wird. Wir nehmen daher

an, dass steigende Skalenerträge der dominierende Faktor für die Produktivität des erneuerbaren Energiesektors sind. Auf dem fossilen Extraktionssektor stellt sich die Lage anders dar. Hier sind nicht die steigenden Skalenerträge, sondern die Auswirkung des technischen Fortschritts in der Explorations- und Extraktionstechnik vor dem Hintergrund einer sich verknappenden Ressourcenbasis entscheidend. Die Wirkung dieses technischen Fortschritts wird in der Literatur meistens durch Schätzungen für die Grenzkosten der Ressourcenextraktion MC_{ext} in Abhängigkeit von der kumulierten extrahierten Ressourcen \widehat{R}_{ext} quantifiziert. Die in das Modell MIND einfließende Schätzung von Rogner [1997]

$$MC_{ext}(\widehat{R}_{ext}) = \chi_1 + \chi_2 \cdot \left(\frac{\widehat{R}_{ext}}{\chi_3}\right)^4$$

$$\chi_1 = 0.113 \frac{\text{tril\$}}{\text{GtC}}, \quad \chi_2 = 0.113 \frac{\text{tril\$}}{\text{GtC}}, \quad \chi_3 = 3500 \text{ GtC}$$

besagt, dass die kostenmindernde Wirkung des technologischen Fortschritt die kostensteigernde Wirkung der Ressourcenverknappung zwar nicht übersteigen, aber bis zur Ausschöpfung einer Reserve von $\chi_3 = 3500 \text{ GtC}$ [Nakićenović et al., 1996] nahezu neutralisieren kann. Im Rahmen von MIND setzen wir diese Kostenabschätzung in einen sich mit steigenden Kosten verringernden Produktivitätsfaktor μ_{ext} auf dem fossilen Extraktionssektor um:

$$\mu_{ext}(\widehat{R}_{ext}) = \left(1 + \frac{\chi_2}{\chi_1} \cdot \left(\frac{\widehat{R}_{ext}}{\chi_3}\right)^4\right)^{-1}$$

Der Faktor μ_{ext} wirkt dem Anstieg der Produktivität durch steigende Skalenerträge entgegen. Sobald die fossilen Ressourcen über die Basismenge von 3500 GtC hinaus abgebaut werden, dominieren die Produktivitätsverluste durch die Ressourcenverknappung die möglichen Gewinne durch steigenden Skalenerträge.

Die Abschätzung der marginalen Extraktionskosten und der Ressourcenbasis ist bereits an anderer Stelle dargestellt worden (Abschnitt 3.3). In diesem Abschnitt wollen wir die Wirkung der steigenden Skalenerträge auf die Produktivitätsfaktoren κ diskutieren. Dabei beschränken wir uns auf die funktionale Form des Produktivitätsfaktors κ_{ren} im erneuerbaren Energiesektor, in dem die steigenden Skalenerträge eine wesentlich bedeutsamere Rolle als im fossilen Extraktionssektor spielen. Die funktionale Form des Produktivitätsfaktors κ_{res} auf dem Extraktions-

sektor ist vollkommen analog.

Die Produktivität im erneuerbaren Energiesektor hat ein Anfangsniveau von κ_o zum Zeitpunkt t_o und kann durch steigenden Skalenerträge maximal auf ein Niveau κ_{max} wachsen. Wir nehmen an, dass κ_{res} ein logistisches Wachstum in Abhängigkeit der „gedämpften“ kumulierten Energiemenge

$$\tilde{E}(t) = \int_{t_o}^t E(t')^\beta dt' , \quad \beta = 0.4$$

aufweist. Die ökonomische Bedeutung dieses Dämpfungsfaktors wird weiter unten erläutert. Damit überhaupt Skalenerträge realisiert werden können, muss die Energieproduktion ein Minimalniveau E_{min} übersteigen. Mit diesen Annahmen sieht die funktionale Form des Produktionsfaktors folgendermaßen aus:

$$\kappa_{res}(\tilde{E}, t) = \frac{\kappa_o \kappa_{max}}{\kappa_o + (\kappa_{max} - \kappa_o) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\tau} \left(\frac{\tilde{E}}{E_{min}^\beta} - t + t_o\right)\right)} \quad (4.21)$$

Die „gedämpfte“ kumulierte Energiemenge \tilde{E} wird durch die „gedämpfte“ Minimalenergieproduktion E_{min}^β normiert, um dem verbleibenden Parameter τ im Exponenten die Dimension einer Zeitkonstanten zu geben. Diese Zeitkonstante kann als technische Eigenschaft der dargestellten Technik interpretiert werden. Die Skalenerträge können umso schneller realisiert werden, je kleiner diese Zeitkonstante ist. Da Gleichung (4.21) eine recht komplizierte Form hat, wird im Modell MIND eine diskretisierte Form der korrespondierenden Differentialgleichung

$$\begin{aligned} \dot{\kappa}_{res}(t) &= \kappa_{res}(t) \cdot \frac{(\kappa_{max} - \kappa_{res}(t))}{\kappa_{max}} \cdot \frac{1}{\tau} \left(\left(\frac{E(t)}{E_{min}} \right)^\beta - 1 \right) \\ \kappa_{res}(t_0) &= \kappa_o \end{aligned} \quad (4.22)$$

verwendet.

Im folgenden wollen wir die wichtigsten Eigenschaften der funktionalen Form (4.21) diskutieren.

- Der Dämpfungsparameter $\beta < 1$ führt zu einer Pfadabhängigkeit der steigenden Skalenerträge. Diese sind nicht nur durch die kumulierte Energiemenge

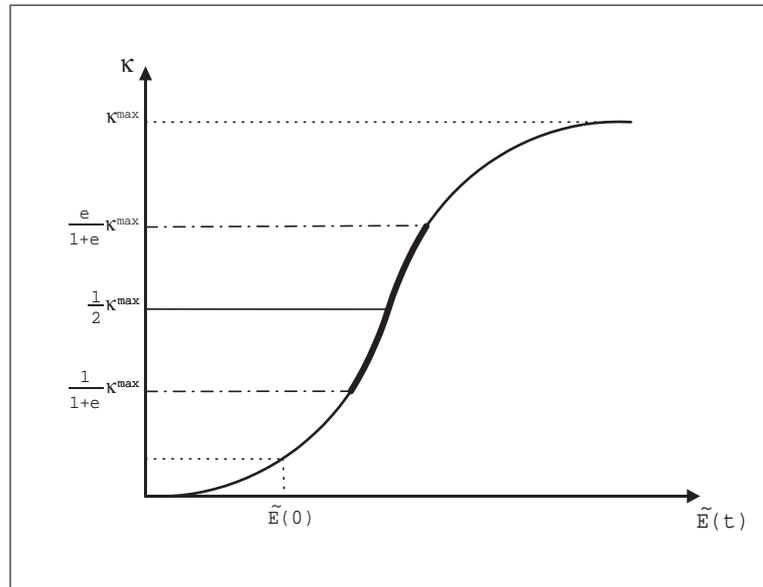


Abbildung 4.1: Verlauf der Lernkurve

\widehat{E} bestimmt, wie es für $\beta = 1$ der Fall wäre, sondern auch durch den zeitlichen Verlauf der Energieproduktion. Je schneller die Energieproduktion erhöht wird, umso stärker macht sich die Dämpfung bemerkbar. Ein schnelles Hochfahren zeitigt somit geringere Skalenerträge als ein langfristig angelegter Aufbau der Energieproduktion. Hier zeigt sich der in den endogenen Wachstumstheorie diskutierte Effekt des *Stepping on toes* [Jones and Williams, 1997]. Das Ausmaß dieses Effektes wird über den Parameter β gesteuert.

- Es gibt aber nicht nur ein „learning by doing“ sondern auch ein Vergessen von Routinen, wenn sie außer Gebrauch sind [Nelson and Winter, 1982]. Darum haben wir in dieses Modell auch einen Vergessensterm eingeführt. Der „Vergessensterm“ t/τ ist gerade so gewählt, dass es zu keiner Produktivitätssteigerung durch steigende Skalenerträge kommt, wenn die durchschnittlich pro Jahr produzierte Energie nicht das Minimalniveau E_{min} auf geeignete Weise übersteigt. Sinkt die Energieproduktion unter E_{min} , oder wird sie sogar ganz eingestellt, so gehen die bis dato erreichten Rationalisierungs- und Lernerfolge teilweise wieder verloren, und der Produktivitätsfaktor κ_{res} sinkt. Im Extremfall einer längerfristigen Einstellung der Energieproduktion kann der Produktivitätsfaktor sogar unter sein Anfangsniveau κ_o sinken. Dieser Fall ist besonders für den

fossilen Extraktionssektor wichtig. Kommt es aufgrund der Verknappung der Reserve oder den Anforderungen des Klimaschutzes zu einer Einstellung der Förderung fossiler Brennstoffe, so gerät das technologische Know-How zunehmend in Vergessenheit, und der Produktivitätsfaktor κ_{ext} nimmt mit der Zeit ab.

- Die Zeitskala τ bestimmt die Geschwindigkeit der Produktivitätssteigerung durch steigende Skalenerträge. Um ihr eine Anschauung zu geben, nehmen wir den Fall kontinuierlichen Lernens ($\tilde{E}(t) = 2 E_{min}^\beta t$) an. In diesem Fall kann der Produktionskoeffizient κ_{res} innerhalb der Zeit $2 k \tau$ vom Niveau $\frac{1}{1+e^k} \kappa_{max}$ auf das e^k -fache Niveau $\frac{e^k}{1+e^k} \kappa_{max}$ angehoben werden. Ist z.B. $\tau = 50$ Jahre, so kann in 200 Jahren durch kontinuierliches Lernen maximal eine Steigerung des Produktivitätsfaktors von $0.76 \kappa_{max}$ erreicht werden.
- Die funktionale Form der Produktivität ist unabhängig von der Wahl des Anfangszeitpunkts t_o und des korrespondierenden Anfangswertes κ_o . Wird ein anderer Anfangszeitpunkt $t'_o > t_o$ mit dem Anfangswert κ'_o gewählt, so bestimmt sich das zukünftige und vergangene Verhalten des Produktivitätsfaktors unverändert aus Gleichung (4.21). Die Vergangenheit zum Zeitpunkt $t_o < t < t'_o$ wird erhalten, indem man die im Zeitraum $[t, t'_o]$ kumulierte Energieproduktion negativ veranschlagt, d.h. $\tilde{E}(t) = \int_{t'_o}^t E(t')^\beta dt' = - \int_t^{t'_o} E(t')^\beta dt'$.
- Die Unabhängigkeit der Gleichung (4.21) von der Wahl des Anfangspunktes (t_o, κ_o) spiegelt ihre symmetrische Form um den Punkt $\frac{\kappa_{max}}{2}$ wieder. In der Anfangszeit des Rationalisierungs- und Lernprozesses ($\kappa \ll \frac{\kappa_{max}}{2}$) führen die steigenden Skalenerträge zu einem exponentiellen Ansteigen des Produktivitätsfaktors in Abhängigkeit von der „gedämpften“ kumulierten Energiemenge \tilde{E} . In der Übergangszeit ($\kappa \approx \frac{\kappa_{max}}{2}$) entfalten die steigenden Skalenerträge ihre größte Wirkung, und der Produktivitätsfaktor steigt linear in \tilde{E} . In der Ausklingzeit schließlich ($\kappa \approx \kappa_{max}$) kommt es zu einer Sättigung, und die Gewinne durch steigende Skalenerträge fallen exponentiell ab.

Die beschriebene Symmetrie wird allerdings durch die Festlegung eines minimalen Produktionsniveaus E_{min} mit minimaler Produktivität κ_{min} gebrochen. Ab diesem Produktionsniveau kann es erst zu einer Produktivitätszunahme durch steigende Skalenerträge kommen.

In der Literatur wird für die kostenmindernde Wirkung steigender Skalenerträge, z.B. im Bereich erneuerbarer Energietechnologien, häufig ein doppellogarithmischer Zusammenhang zwischen Kosten pro Produktionseinheit MC und kumulierter Produktion \hat{Y} festgestellt [World Energy Assessment Report, 2000, S.16 und die dort aufgeführten Referenzen]:

$$\ln MC = -\alpha \ln \hat{Y} + b \quad \Leftrightarrow \quad MC \sim \hat{Y}^{-\alpha}$$

Dieser algebraische Zusammenhang hat nur über begrenzte Zeiträume und für bestimmte Reifegrade einer Technologie Gültigkeit. Er liefert zum Beispiel keinerlei Informationen über den Sättigungsbereich der steigenden Skalenerträge, in dem die Senkung der Stückkosten auf ein minimales Kostenniveau (entsprechend dem maximalen Produktivitätsfaktor κ_{max}) einschwingt. Er kann daher auch nicht die Grundlage für die Modellierung der steigenden Skalenerträge in MIND sein, da hier die Entwicklung der erneuerbaren Energien über mehrere Dekaden und verschiedenste Reifegrade verfolgt wird.

Dennoch ist es wichtig, verschiedene Bereiche in der durch Gleichung (4.21) modellierten Produktivitätssteigerung zu identifizieren, in denen es zu einem zeitlich begrenzten algebraischen Zusammenhang zwischen Stückkosten und kumulierter Produktion kommen kann. Die Vergleichbarkeit mit der Literatur kann durch die näherungsweise Identifizierung des inversen Produktivitätsverlaufs $\frac{1}{\kappa_{res}}$ mit dem Stückkostenverlauf, und der Entwicklung der kumulierten Energieproduktion mit der Entwicklung der installierten Kapazität hergestellt werden. Es zeigt sich, dass ein $\hat{E}^{-\alpha}$ -Abfall der Stückkosten sowohl in der Übergangszeit, als auch - für genügend große Zeitskalen τ - in der Anfangs- und Abklingphase auftreten kann. Der wichtige Unterschied ist, dass in der Übergangs- und Abklingzeit sich die Abnahme der Stückkosten mittelfristig gegenüber dem algebraischen Zusammenhang verringern wird (α nimmt ab), während in der Anfangsphase die Abnahme der Stückkosten gegenüber dem algebraischen Zusammenhang noch zunehmen wird (α nimmt zu). Da durch die Parameterwahl von κ_o und κ_{max} im Modell MIND festgelegt ist, dass sich die erneuerbaren Energien noch in der Anfangsphase ihrer Entwicklung befinden, macht das Modell mit der Wahl der Gleichung (4.21) die Annahme einer sich beschleunigenden Produktivitätszunahme auf dem Sektor der erneuerbaren Energien in den nächsten Dekaden. Mit anderen Worten: Die erneuerbaren Energien haben ihre beste Zeit noch vor sich.

Diese Sichtweise ist keineswegs zwingend. So kann es durchaus sein, dass die steigenden Skalenerträge am stärksten in der Anfangsphase realisiert werden. Unter dieser Voraussetzung muss die Modellierung des Produktionsfaktors κ_{res} qualitativ verändert werden. Das konservative Analogon zu Gleichung (4.21) lautet wie folgt:

$$\kappa_{res}(\widehat{E}, t) = \frac{\kappa_{min} \kappa_{max}}{\kappa_{min} + (\kappa_{max} - \kappa_{min}) \cdot \left(\frac{\widehat{E}}{E_{min} \cdot (t - t_{min})} \right)^{-\alpha}} \quad (4.23)$$

Es ist vorgesehen, im Rahmen zukünftiger Forschungen das Verhalten des Modells MIND bei Annahme von Gleichung (4.23) zu untersuchen. Dem vorliegenden Bericht liegt MIND mit dem in Gleichung (4.21) formulierten Modellzusammenhang zugrunde.

In Gleichung (4.21) wird die Produktivitätszunahme durch steigende Skalenerträge durch zwei Anfangswerte (κ_o, E_{min}) und drei Entwicklungskonstanten ($\kappa_{max}, \tau, \beta$) parametrisiert. Von den Entwicklungsparametern spielen vor allem das *langfristige Produktivitätspotential der erneuerbaren Energien* κ_{max} und die *Zeitskala der Lern- und Rationalisierungseffekte* τ eine wichtige Rolle für die Einschätzung der Frage, ob eine Transformation des Energiesystems volkswirtschaftlich machbar und zugleich klimaschützend wirksam sein kann. Sie haben daher auch in der für diesen Bericht vorgenommenen Sensitivitätsanalyse mit MIND besondere Beachtung gefunden.

Um ein grundsätzliches Abwägen der durch die erneuerbaren Energien eröffneten Option gegenüber einer fossilen Zukunft zu erlauben, wird im Modell MIND der erneuerbare Energiesektor aggregiert betrachtet. Eine wichtige Weiterentwicklung des Modells wird sein, die einzelnen technologischen Optionen auf diesem Sektor aufzulösen, und jeweils mit einem eigenen Produktivitätskoeffizienten von der Form (4.21) zu versehen. Es wäre dann die Aufgabe des Modells, eine optimale Technologiefolge auf dem erneuerbaren Sektor zu ermitteln. Diese wird vermutlich durch die Unterschiede in den Parametern κ_{max} und τ für die einzelnen Technologien bestimmt. Doch auch in Abwesenheit eines auf diese Weise weiterentwickelten Modells kann die Abschätzung von κ_{max} und τ für erneuerbare Energien wie Wind, Photovoltaik und Biomasse von Nutzen sein. Durch die von ihnen geleistete Fokussierung des Entwicklungspotentials einer Technologie eignen sie sich hervorragend zur Sze-

narienbildung. So lässt sich zum Beispiel ein Szenario vorstellen, in dem zunächst eine schnelle Technologie mit kleinem τ , aber auch geringem Potential κ_{max} (Wind) verfolgt wird. Langfristig setzt sich in dem Szenario jedoch eine Lösung mit hohem Potential κ_{max} durch, welches nur auf einer sehr großen Zeitskala τ ausgeschöpft werden kann (Photovoltaik).

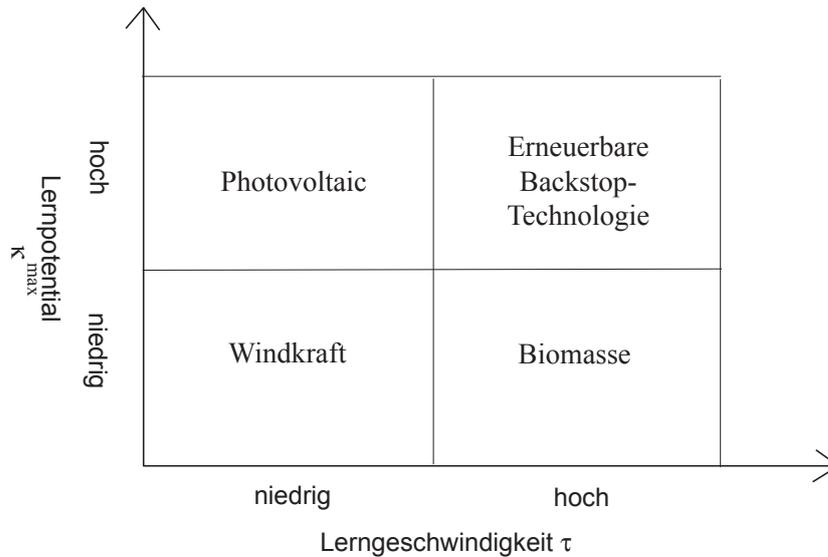


Abbildung 4.2: Risikomatrix für erneuerbare Energien: Das Lernpotential wird gegen die Lerngeschwindigkeit abgetragen

Dieser Grundgedanke lässt sich in einer Vierfeldertafel verdichten (siehe Abbildung 4.2), bei der das Lernpotential κ_{max} und die Lerngeschwindigkeit τ gegeneinander abgetragen sind. Beide Faktoren sind entscheidend für die Dynamik der Lernkurven und damit auch für die Risiken, die mit erneuerbaren Energien verbunden sind. Da wir nicht die Kompetenz haben, eine solche Klassifikation vorzunehmen, bitten wir den Beirat, eine solche Klassifikation zu versuchen.

4.2 Szenario BAU: Fossile Zukunft unter Vernachlässigung des Klimas

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Business-As-Usual Pfades vorgestellt; wir werden zeigen, dass das Modell die stilisierten Fakten der Wachstumstheorie reproduziert. Die Ergebnisse des BAU-Pfades werden dann im Lichte der

Environmental-Kuznets-Kurve interpretiert. Die Environmental-Kuznets-Kurve beschreibt einen statistischen Zusammenhang, wonach die Umweltbelastung zunächst mit steigendem Pro-Kopf-Einkommen steigt, und schließlich sogar absolut zurückgeht. Auf der Basis der Environmental Kuznets Kurve wird von vielen Ökonomen und Soziologen nicht bestritten, dass es ein Umweltproblem gibt; bestritten wird nur, dass ein klimapolitischer Handlungsbedarf existiert, weil es ohnehin einen Strukturwandel zu verminderten Emissionen gebe, der durch Wachstumspolitik besser zu fördern sei. Wir zeigen im zweiten Teil dieses Kapitels, dass der Strukturwandel viel zu langsam ist, um klimapolitisch relevant zu sein.

4.2.1 Die stilisierten Fakten des Wachstums

Wer den Umbau des Energiesystems studieren will, benötigt ein Modell des Strukturwandels. Wer Strukturwandel verstehen will, muss sich Rechenschaft darüber ablegen, ob sich in diesem Wandel stabile Muster identifizieren lassen. In der Wachstumstheorie seit Kaldor [1963] [Maußner and Klump, 1996] wurden solche stabilen Muster identifiziert. Diese stilisierten Fakten sollten durch MIND zumindest qualitativ für die nächsten 200 Jahre reproduziert werden können.

Dem liegt die Vermutung zugrunde, der Strukturwandel des Energiesystems werde am grundlegenden makroökonomischen Wachstumsmuster nichts ändern. Für die letzten 150 Jahre ist diese Annahme gut bestätigt. Die Modellrechnungen deuten auch nicht auf einen Strukturbruch hin. Dennoch ist die Annahme, das Wachstumsmuster werde sich nicht wesentlich ändern und vor allem zu keinen säkularen Krisen führen, durchaus diskussionswürdig. Wir hoffen aber zeigen zu können, dass die Transformation des Energiesystems weder ein Verfall der Profitrate bedeuten muss noch eine steigende Kapitalproduktivität oder gar ein Verfall der Arbeitsproduktivität. Es sollen zunächst die stilisierten Fakten erläutert werden, wie sie bislang in der Wachstumstheorie unbestritten sind; danach werden wir zeigen, dass MIND diese reproduziert. Wir werden die stilisierten Fakten ergänzen, um dann am Schluss zu rechtfertigen, warum wir sie als Konstanten des sozialen Wandels betrachten.

Die stilisierten Fakten

Der Zeitraum seit der Industrialisierung lässt sich nach Kaldor [1963] durch folgende stilisierte Fakten beschreiben:

1. Der reale Output pro Kopf wächst mit einer positiven Wachstumsrate, die ungefähr der Wachstumsrate der durchschnittlichen Arbeitsproduktivität entspricht.
2. Die Kapitalintensität wächst ebenfalls mit einer positiven Wachstumsrate.
3. Die durchschnittliche Kapitalproduktivität bleibt ebenso konstant wie der Zinssatz.
4. Die Einkommensquoten für Kapital und Arbeit bleiben konstant; dies impliziert, dass die Wachstumsrate des Reallohnes derjenigen der durchschnittlichen Arbeitsproduktivität entspricht.

Diese stilisierten Fakten gelten für die Bedingung eines steady-state; während der Anpassungsprozesse zum steady-state kann es durchaus zur Veränderung der Einkommensquoten kommen; Es ist erstaunlich, wie stabil dieses Wachstumsmuster historisch verlaufen ist: Selbst die beiden Weltkriege haben das Wachstumsmuster der Industrienationen nicht grundlegend verändert; all die von Marx, Ricardo und Malthus befürchteten säkularen Krisensymptome sind bislang nicht eingetreten. Es wäre eine eigene Diskussion wert, diese Krisensymptome explizit auf den Umbau des Energiesystems zu beziehen. Wir werden diese Diskussion aber nicht führen, sondern plausibel machen, warum dieses Wachstumsmuster durch den Umbau des Energiesystems nicht gestört wird.

Die Frage, ob der Übergang zu einer nachhaltigen Entwicklung überhaupt mit stabilen Wachstumsmustern vereinbar ist, wurde im Rahmen des Integrated Assessment bislang nicht ausreichend diskutiert; so ist unklar, ob die verwendeten Integrated Assessment Modelle überhaupt die stilisierten Fakten qualitativ reproduzieren.

Wie die Abbildungen zeigen, ist MIND in der Lage, die stilisierten Fakten zu reproduzieren.

Das Wachstumsmuster zeigt, dass das Modell keinerlei säkularen Krisenerscheinungen aufzeigt: weder steigt der Kapitalkoeffizient säkular an (Marx), noch sinken die Lohn- und Kapitaleinkommensquote zugunsten der Einkommen, die aus erschöpfbaren Ressourcenbeständen stammen (Ricardo), noch verfällt das Pro-Kopf-Einkommen trotz steigender Bevölkerung (Malthus). Auf die ökonomische und soziale Mechanik, die diese säkularen Krisenphänomene verhindert, werden wir noch

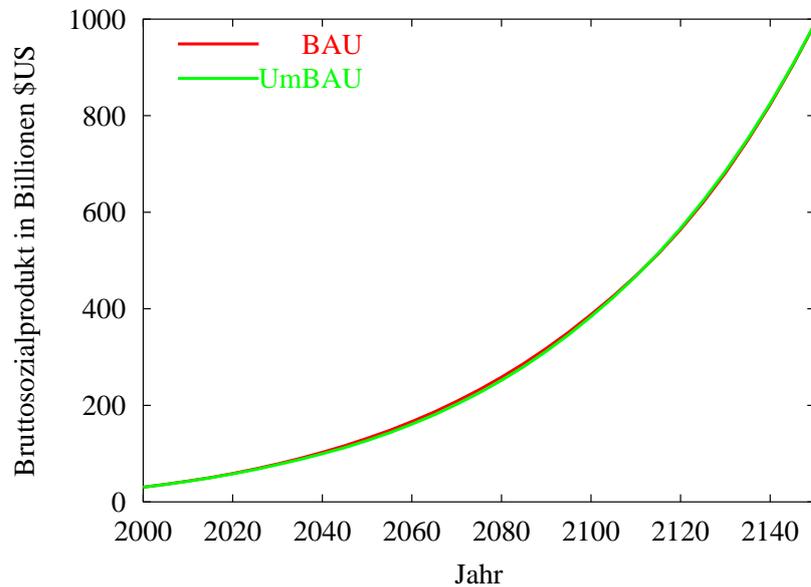


Abbildung 4.3: Der Output steigt mit positiver Wachstumsrate

näher eingehen.

Für umweltökonomische Fragen reicht es jedoch nicht, auf die herkömmlichen stilisierten Fakten zu rekurrieren. In der Tat stellt sich die Frage, wie die Dynamik der Energienutzung hier ins Bild kommt. Dabei lassen sich für die Energienutzung derartige stilisierte Fakten durchaus auflisten.

1. Der Verbrauch fossiler Energie ist mit positiver Wachstumsrate gestiegen. Dieses stilisierte Faktum ist mit dem Hotelling-Pfad unvereinbar.
2. Die Arbeitsproduktivität ist schneller gestiegen als die Produktivität der Energienutzung. Dies impliziert, dass die Energieintensität der Arbeit ebenfalls gestiegen ist.
3. Die Einkommensquote für Energie hat sich nicht wesentlich geändert. In Abbildung 4.7 ist die unterste Linie die Energiequote, die mittlere die Lohnquote, und die oberste Linie die Kapitaleinkommensquote.
4. Im Energiesystem hat es seit der Industrialisierung einen kontinuierlichen Strukturwandel von der Nutzung traditioneller Biomasse, zu Kohle, Öl und Gas gegeben. Dieser säkulare Strukturwandel des Energiesystems hat keine

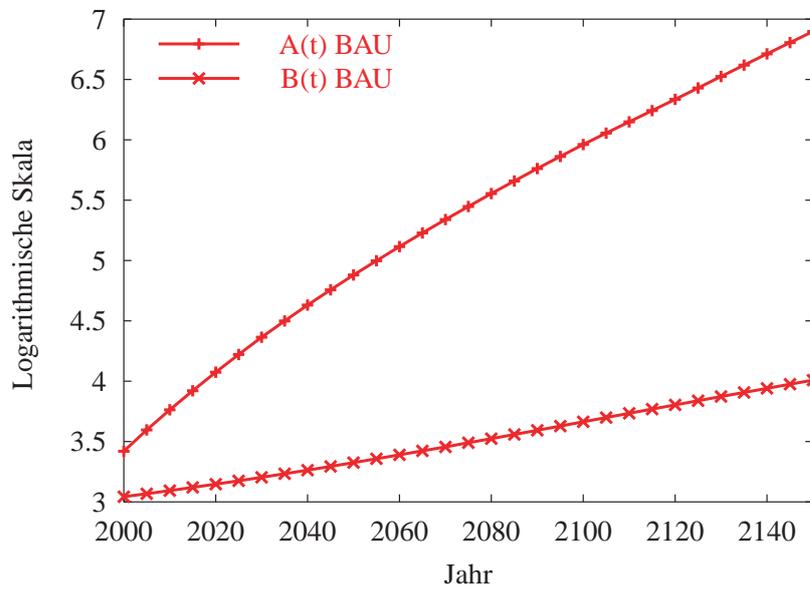


Abbildung 4.4: Die Arbeitsproduktivität steigt schneller als die Energieproduktivität

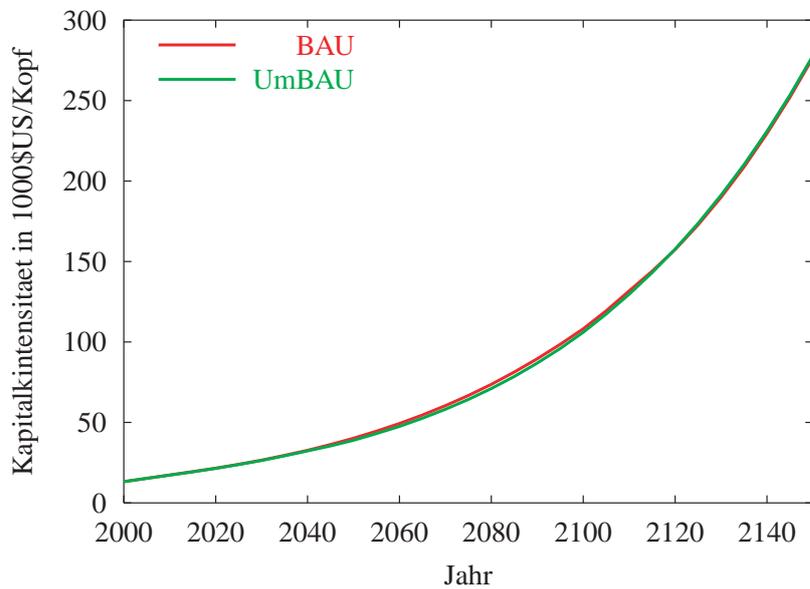


Abbildung 4.5: Die Kapitalintensität zeigt ebenfalls ein exponentielles Wachstum

Wachstumseinbrüche verursacht, aber zu einer sinkenden Kohlenstoffintensität geführt [Nakićenović and Grübler, 2000].

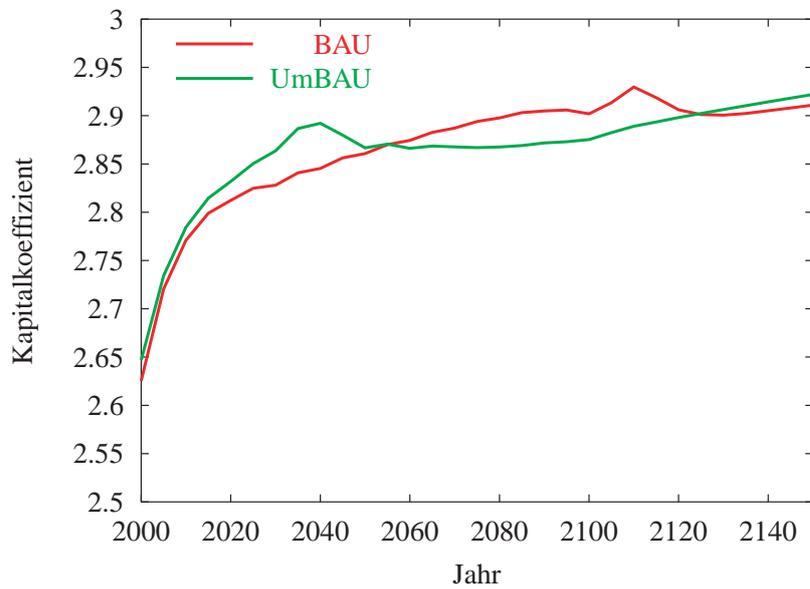


Abbildung 4.6: Der Kapitalkoeffizient und damit auch der Zins ist konstant

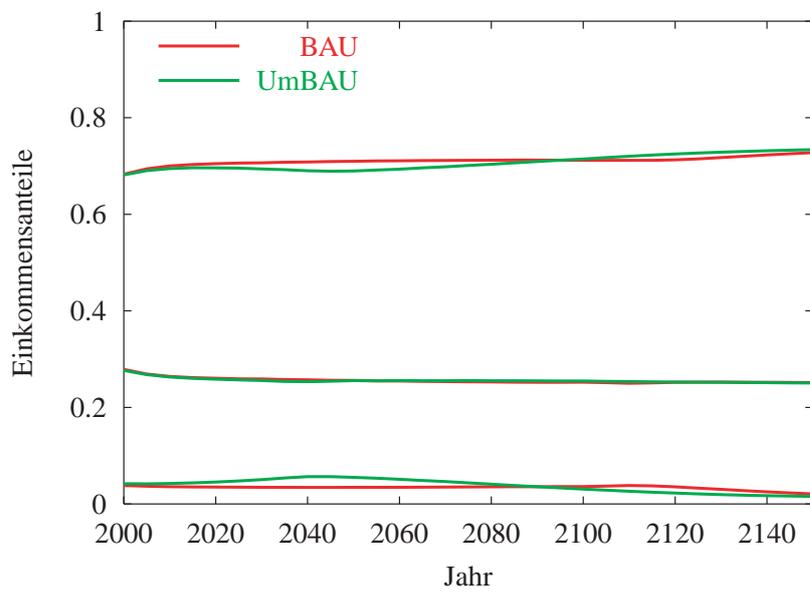


Abbildung 4.7: Die Einkommensquoten sind stabil. Die unterste Linie ist die Energiequote, die mittlere die Lohnquote, und die oberste Linie die Kapitaleinkommensquote.

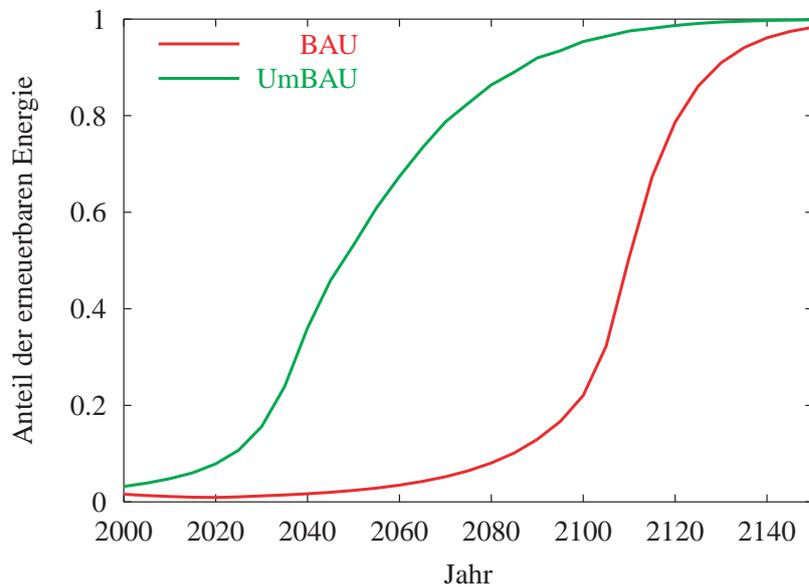


Abbildung 4.8: Der Anteil erneuerbarer Energie an der gesamten Primärenergieproduktion nimmt zu

Wir werden nachfolgend die stilisierten Fakten sowohl für den BAU-Fall als auch für den UmBAU-Fall darstellen, um die Stabilität der stilisierten Fakten, trotz des Strukturwandels im Energiesystem, zu betonen.

Der historische Strukturwandel des Energiesystems hat historisch zu keinen Strukturbrüchen im makroökonomischen Wachstumsverlauf geführt. Für den BAU-Fall ist dies auch in MIND der Fall, wie die nachfolgenden Graphiken zeigen. Wir werden Szenarien vorstellen, in denen der Strukturwandel durchaus zu einer säkularen Veränderung des Wachstumsprozesses führen kann.

Es kommt auch im BAU-Fall zu einem Umbau des Energiesystems, ohne dass der säkulare Wachstumsprozess dauerhaft gestört wird. Der Anteil der erneuerbaren Energien nimmt zu; die funktionale Einkommensverteilung zwischen den drei Produktionsfaktoren konvergiert auf ein steady-state, in dem die Einkommensquoten konstant bleiben. Im BAU-Szenario kommt es zu steigenden Energiepreisen und sogar zu steigenden Schattenpreisen der Emissionen. Diese werden aber nicht durch die Klimapolitik verursacht, sondern einerseits durch die Ende des 21. Jahrhunderts einsetzende ökonomische Knappheit der fossilen Ressourcen, andererseits durch die sich durchsetzenden Lerneffekte bei den erneuerbaren Energien; letztere werden zu-

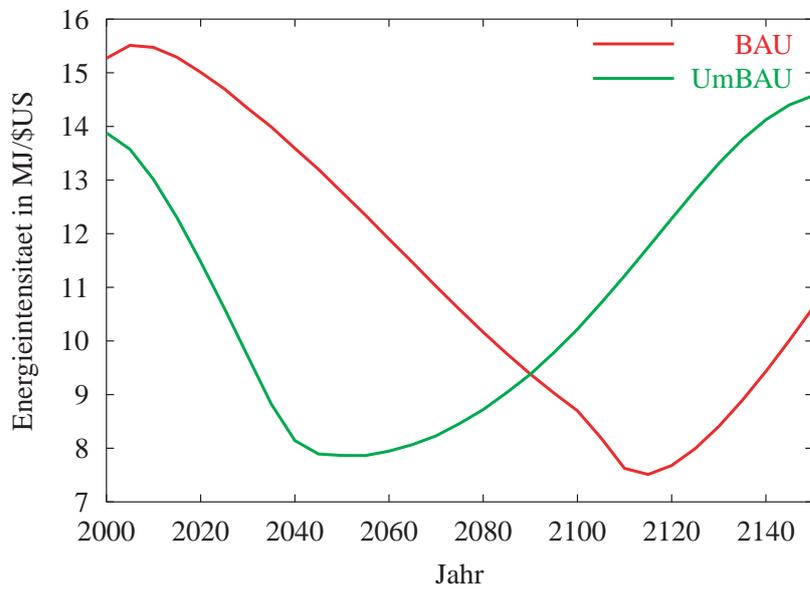


Abbildung 4.9: Die Energieintensität sinkt

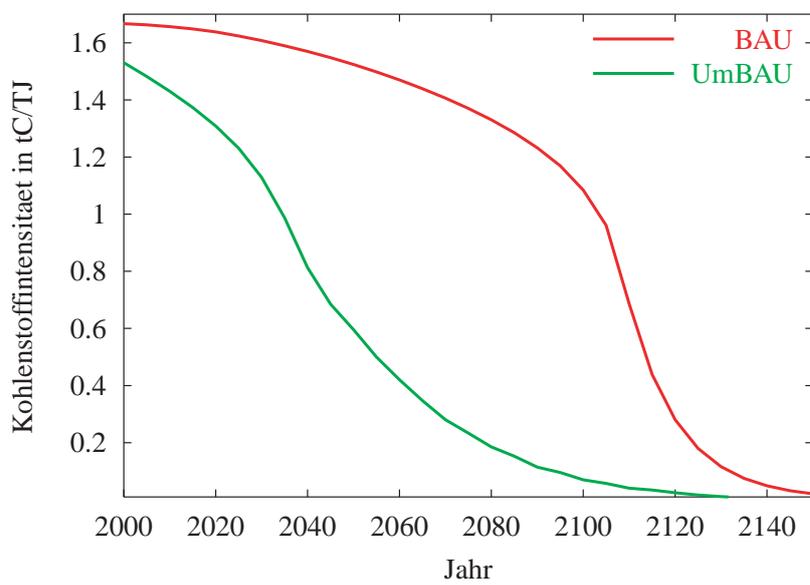


Abbildung 4.10: Die Kohlenstoffintensität sinkt

nehmend konkurrenzfähig gegenüber den fossilen Energieträgern. Diese Substitutionsstrategie wird kombiniert mit einer Erhöhung der Effizienz. Zunächst wird die Effizienz im fossilen Energiesystem erhöht. Da die erneuerbaren Energien nicht mehr

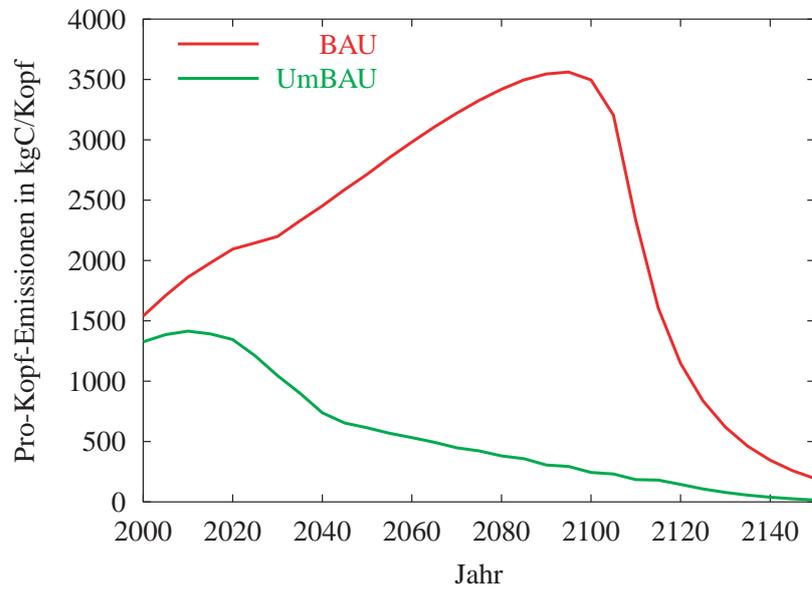


Abbildung 4.11: Die Emissionen steigen an, flachen jedoch wegen der sinkenden Energie- und Kohlenstoffintensität ab. Diese wiederum nimmt ab, weil sich zum Ende des Jahrhunderts die steigenden Extraktionsgrenzkosten fossiler Energie bemerkbar machen.

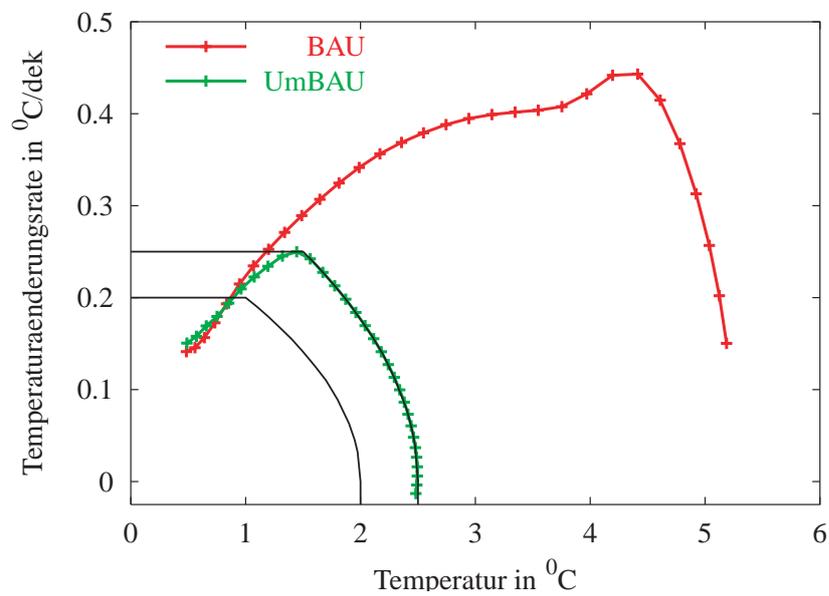


Abbildung 4.12: Klimafenster

auf knappen Beständen beruhen, wird die Effizienzsteigerung wieder unrentabel; die Energieintensität beginnt zu steigen.

Es kommt also auch im BAU-Fall zu einem endogenen Strukturwandel, der im wesentlichen auf einem induzierten Fortschritt beruht; das Modell MIND ist in der Lage, einen Strukturwandel des Energiesystems abzubilden. Dieses Phänomen soll nun etwas näher erläutert werden. Wiederum zeigen wir die Simulationsläufe für die nächsten hundert Jahre; wie Abbildung 4.12 zeigt, führt das BAU-Szenario zu einer Temperaturentwicklung jenseits der Klimafenster.

Induzierter Technischer Fortschritt

Das Phänomen, um dessen Modellierung wir uns in MIND bemüht haben, beruht auf einem Konzept des technischen Fortschritts, das in der Literatur unter dem Stichwort *induced technological change* oder *bias of technological change* behandelt wird [Ruttan, 2000, Kennedy, 1964, Scott, 1989].

In der Diskussion um die stilisierten Fakten hatten wir festgestellt, dass die Arbeitsproduktivität schneller gestiegen ist als die Energieproduktivität. Dieser *bias* des technischen Fortschritts ist erklärungsbedürftig, wenn man die Parameter nicht exogen setzen will, sondern die ökonomischen Gründe für diesen *bias* verstehen will. Wir greifen dabei auf eine Diskussion zurück, die versuchte zu erklären, warum die Kapitalproduktivität historisch konstant ist, die Arbeitsproduktivität jedoch eine positive Wachstumsrate hat. Es lässt sich zeigen, dass die Kapitalproduktivität konstant sein muss, wenn die Wachstumsrate des Sozialproduktes maximiert werden soll [Ramanathan, 1982]. Der harrod-neutrale technische Fortschritt lässt sich damit begründen, dass die Wachstumsrate des Sozialproduktes maximiert wird, wenn die Wirtschaft die Wahl hat, zwischen der Erhöhung der Arbeits- und Kapitalproduktivität zu entscheiden. Dabei wurde für die gesamte Wirtschaft eine Fortschrittsgrenze postuliert, die einen *trade-off* zwischen der Wachstumsrate der Arbeits- und Kapitalproduktivität beschreibt.

Dieser Grundgedanke lässt sich nun weiterführen, indem man die Wahlmöglichkeit zwischen Energie- und Arbeitsproduktivität in ein Ramsey-Modell einführt. Es lässt sich dann zeigen, dass durch Einführung erschöpfbarer Ressourcen der technische Fortschritt ebenfalls harrod-neutral sein muss und die Wachstumsrate der Energieproduktivität schneller steigen muss als die Wachstumsrate der Arbeitsproduktivität [Edenhofer, 2000] (siehe Abbildung 4.4; dieses Ergebnis reproduziert alle

stilisierten Fakten des Wachstums. Allerdings ergibt sich aus diesem Modell auch der Hotelling-Fall, der nicht mit den stilisierten Fakten übereinstimmt. Darum wurde im Rahmen von MIND eine entscheidende Erweiterung des Modells versucht.

Die konventionellen Modelle, die eine optimale Richtung des technischen Fortschritts ableiten, leiden aller an einer unzureichenden entscheidungstheoretischen Fundierung. So wird zu recht die Annahme einer exogenen Fortschrittsgrenze kritisiert, der entlang die Wirtschaft wählen kann. Diese Fortschrittsgrenze hat keine vernünftige ökonomische Fundierung [Binswanger, 1974, Smulders and de Nooij, 1999], weil implizit vorausgesetzt wird, dass ein gegebenes Forschungs- und Entwicklungsbudget auf die Erhöhung der Arbeits- und Energieproduktivität verteilt wird und nicht endogen durch Investitionsentscheidungen bestimmt wird. Die endogene Bestimmung der Richtung des technischen Fortschritts sollte daher im Kontext der endogenen Wachstumstheorie geschehen.

Induziert wird der technische Fortschritt in MIND durch entstehende Knappheiten oder bottlenecks des Systems. Diese entstehenden Knappheiten werden durch Investitionen in Forschung und Entwicklung einerseits und durch die Realisierung steigender Skalenerträge andererseits überwunden. Dadurch gelingt es MIND einerseits, die stilisierten Fakten des Wachstums zu reproduzieren; andererseits ist es möglich, den Strukturwandel des Energiesystems endogen zu bestimmen. Es gibt durchaus endogene Wachstumsmodelle, die ebenfalls die stilisierten Fakten des Wachstums reproduzieren, allerdings gelingt es ihnen nicht, die endogene Dynamik (endogenes Angebot und Nachfrage nach fossiler und erneuerbarer Energie) des Energiesystems in einem Wachstumskontext zu beschreiben [Smulders and de Nooij, 1999, van der Zwann et al., 1999].

4.2.2 Ökologische Modernisierung

Wie Abbildung 4.12 zeigt, wird das Klimafenster in einem BAU-Szenario bei weitem verfehlt werden. In diesem Szenario findet zwar ein Strukturwandel statt, er vollzieht sich aber viel zu langsam. In diesem Abschnitt soll versucht werden, diese Ergebnisse im Lichte der Environmental Kuznets Kurve zu interpretieren.

Die Environmental Kuznets Kurve beschreibt eine statistische Regression zwischen einer zunächst nicht näher spezifizierten Umweltbelastung und dem Pro-Kopf-Einkommen. Für diese statistische Regression gibt es nun verschiedene Interpretationsmöglichkeiten, die allesamt gewichtige klimapolitische Konsequenzen haben.

Die erste Interpretation behauptet, die Präferenz für Umwelt nehme mit steigendem Einkommen zu und damit würde auch die Umweltbelastung sinken. Der beste Weg, die Umweltbelastung zu reduzieren sei es daher, eine offensive Wachstumspolitik zu betreiben (Beckerman). Die Interpretation, der Strukturwandel werde vor allem durch veränderte Umweltpräferenzen getrieben, ist keineswegs zwingend. Das statistische Phänomen einer Environmental Kuznets Kurve lässt sich auch mit anderen Dynamiken eines ökonomischen und gesellschaftlichen Strukturwandels vereinbaren. Die Environmental Kurznets Kurve kann dazu verwendet werden, verschiedene Pfade einer (ökologischen) Modernisierung zu charakterisieren.

So haben Gesellschaftstheoretiker wie Stehr [2000] die Vorstellung entwickelt, der Übergang von der Industrie- zur Wissensgesellschaft gehe mit einer generellen „Dematerialisierung“ der Wirtschaft einher. Vermeidungspolitik sei daher gar nicht erforderlich, weil eine Wirtschaftspolitik, die den Übergang von der Industriegesellschaft zur Wissensgesellschaft unterstütze, für die Weltgesellschaft ausreichend sei, um mit dem Klimawandel „fertig“ zu werden. Die Wissensgesellschaft werde nicht mehr wie die Industriegesellschaft abhängig sein von fossiler Energie und knappen mineralischen Rohstoffen. Wissensgesellschaften, so die These, sind anpassungsfähiger und von „der Natur“ emanzipierter als Industriegesellschaften. Darum sei die beste Klimapolitik eben nicht Vermeidungspolitik, sondern die Förderung des Strukturwandels von Industrie- zur Wissensgesellschaft. Der wirklich begrenzende Faktor sei nicht Energie, Boden, Rohstoffe oder das Klima, sondern menschliche Kreativität [Simon, 1996].

Diese These ist jedoch viel zu allgemein und, wie sich zeigen wird, auch zu unpräzise, um ernsthaft gegen eine präventive Klimapolitik ins Feld geführt werden zu können. Die Environmental Kuznets Kurve beschreibt zwar in der Tat einen Strukturwandel, der sich dadurch auszeichnet, dass die Umweltbelastung mancher Schadstoffe absolut mit steigendem Pro-Kopf-Einkommen zurückgegangen ist. Auch lässt sich zeigen, dass mit steigendem Pro-Kopf Einkommen der Verbrauch bestimmter mineralischer Rohstoffe sogar absolut zurückgegangen ist. Bei den Schadstoffemissionen in die Atmosphäre lässt sich jedoch die Environmental Kuznets Kurve nur für Schwefeldioxyde nachweisen, aber nicht für CO₂. Von einer generellen Emanzipation der Menschheit von der Natur kann also keine Rede sein. Der Verbrauch fossiler Energie steigt immer noch, auch in Ländern, die als „Wissensgesellschaften“ gelten dürfen, wenn auch mit geringeren Wachstumsraten.

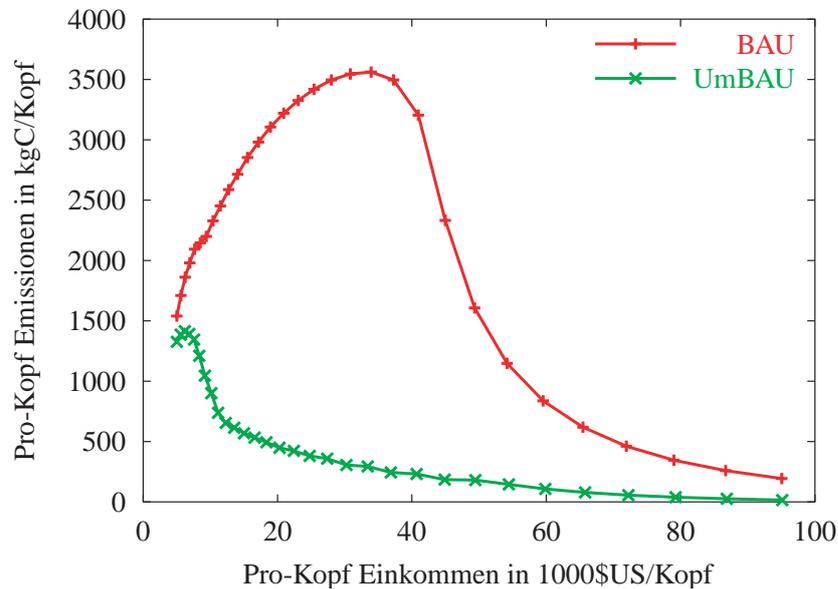


Abbildung 4.13: Die Environmental Kuznets Kurve

Damit stellt sich aber die Frage, wie stark die Pro-Kopf- Einkommen noch steigen müssten, bis es zu einer Entkoppelung zwischen Wachstum und fossilem Energieverbrauch kommt. Wir haben diese Frage mit dem Modell MIND untersucht, indem wir die Environmental Kuznets Kurve für einen Modellauf ohne Leitplanken (business as usual, Abbildung 4.13: blau) und mit einer Leitplanke (Abbildung 4.13: rot) untersucht haben.

Abbildung 4.13 zeigt deutlich, dass die Klimaleitplanken mitnichten eingehalten werden können, wenn man nur auf den Strukturwandel eines business-as-usual Szenarios vertraut. Der Strukturwandel hin zu einer Wissensgesellschaft kann eine präventive Klimapolitik zwar unterstützen, es bedarf aber dennoch darüber hinausgehender Anstrengungen, um das Weltklima dauerhaft zu stabilisieren. Die Simulation zeigt außerdem, dass man mit reinen Plausibilitätsüberlegungen keine zuverlässigen Politikempfehlungen abgeben kann. Ökonomen wie Beckerman und Soziologen wie Nico Stehr haben sicher recht, wenn sie die Bedeutung ökonomischer und sozialer Modernisierung betonen, in der technischer Fortschritt, Wissen und Wissenschaft eine überragende Rolle spielen und spielen werden. Der durch die BAU-Modernisierung induzierte Strukturwandel ist jedoch viel zu langsam, um einen effektiven Klimaschutz zu ermöglichen. Das business-as-usual Szenario aus Abbil-

dung 4.13 führt zu einem Temperaturanstieg von 5 °C bis zum Jahr 2100. Ein solcher Temperaturanstieg dürfte auch die Anpassungsleistung modernisierter Gesellschaften überfordern. Entscheidende Determinanten dieser BAU-Modernisierung sind die marginalen Extraktionskosten und der technische Fortschritt bei den erneuerbaren Energien. Je größer die Extraktionskosten und je höher die Lernkurveneffekte bei den erneuerbaren Energien, um so schneller vollzieht sich dieser Strukturwandel. Sensitivitätsanalysen zeigen jedoch, dass beide Effekte unrealistisch hoch sein müssten, damit es ohne Umweltpolitik zu einem ausreichend schnellen Strukturwandel käme.

Dies macht deutlich, dass der Hinweis auf einen deus ex machina „technischer Fortschritt“ oder „menschliche Kreativität“ wenig aussagekräftig ist [Stehr, 2000, Simon, 1996, Beckermann, 1995]. Auch im business-as-usual Szenario gibt es beträchtlichen „technischen Fortschritt“, nur verhindert er nicht einen Temperaturanstieg, den viele Klimawissenschaftler als katastrophal einschätzen würden. Es wäre daher verantwortungslos, weiterhin durch Emissionen das Schadenspotential zu erhöhen und dabei blind darauf zu hoffen, dass sich künftige Generationen, die übrigens mehrheitlich in den Entwicklungsländern leben werden, zu akzeptablen Bedingungen an ein Erd-System anpassen können, das aus den Fugen geraten ist.

4.3 Szenario UmBAU: Klimaschutz durch Umbau des Energiesystems

In diesem Abschnitt werden wir das UmBAU Szenario vorstellen, das im wesentlichen die Frage stellt, unter welchen Bedingungen ein Umbau des Energiesystems ökonomisch und ökologisch vernünftig ist. Wir werden hier drei sensitive Bereiche identifizieren, die den Umbau entscheidend beeinflussen. Dies sind erstens die steigenden Skalenerträge bei den erneuerbaren Energien, die für die ökonomische Vorteilhaftigkeit des Umbaus ausschlaggebend sind; zweitens verteuert der technische Fortschritt im Bereich der Extraktion die Kosten des Umbaus, und drittens zeigen wir, inwiefern die Sensitivität des Klimasystems den Zeit- und Handlungsdruck für ein UmBAU Szenario erhöht.

4.3.1 Die zentrale Rolle der steigenden Skalenerträge

Wie bereits in der Vorstellung des Modells erläutert, gehen wir davon aus, dass es sowohl im fossilen als auch im erneuerbaren Energiesektor learning by doing gibt. In diesem Abschnitt untersuchen wir den Einfluss der steigenden Skalenerträge im erneuerbaren Energiesektor.

Zu diesem Zweck wird die Zeitkonstante in Gleichung (Gleichung 4.22) variiert. Ökonomisch heißt das: Mit jeder zusätzlich produzierten Einheit steigt κ_{\max} , um schließlich an eine Sättigungsgrenze zu gelangen. Die jahrgangsabhängige Struktur des Kapitalstocks erlaubt es, wichtige Aspekte der Trägheit des Energiesystems zu modellieren, die für die Beurteilung energiepolitischer Strategien von entscheidender Bedeutung sind: Durch (organisatorisches) Lernen erhöht sich die Produktivität des Kapitalstocks im Sektor der erneuerbaren Energien. Würde sich jedoch die Produktivität des gesamten Kapitalstocks erhöhen, würde man die Wirkung dieses Lernens überschätzen; wir gehen daher davon aus, dass dieser Produktivitätseffekt auf den jeweils jüngsten Kapitalbestand durchschlägt. Dieses Trägheitsmoment führt dazu, dass Investitionen in die erneuerbaren Energien vorgezogen werden und die Emissionen schneller reduziert werden als dies der Fall wäre ohne eine jahrgangsabhängige Produktivitätsentwicklung. vorgezogen werden.

In Abschnitt 2.3 haben wir die Frage gestellt, ob nicht der technische Fortschritt die Kosten des Klimaschutzes drastisch reduzieren könnte. Diese vage Vermutung kann nun bestätigt werden. Wie Abbildung 4.14 zeigt, verursachen die Klimaleitplanken durch die Beschleunigung des Lernens im erneuerbaren Energiesektor weniger Konsumverluste. Ein ähnlicher Effekt lässt sich zeigen, wenn das Lernpotential zunimmt.

Der Konsumverlust wurde hier gemessen als Verlust gegenüber dem Referenzszenario. Wie die Abbildung zeigt, steigen die Verluste vorübergehend an, um sich schließlich in Gewinn zu verwandeln.

Je größer das Lernpotential ist, um so schneller steigt der Anteil der erneuerbaren Energien.

Darüber hinaus führen die steigenden Skalenerträge im erneuerbaren Energiesektor dazu, dass der Schattenpreis der Emissionen zwar in der Umbauphase steigt, dann aber wieder abfällt. Ein dauerhaft steigender Energiepreis ist also gar nicht nötig. Die Wirtschaft muss sich also gar nicht dauerhaft auf einem Hotelling-Pfad bewegen, bei dem der Schattenpreis der Ressource im Ausmaß der Wachstumsrate

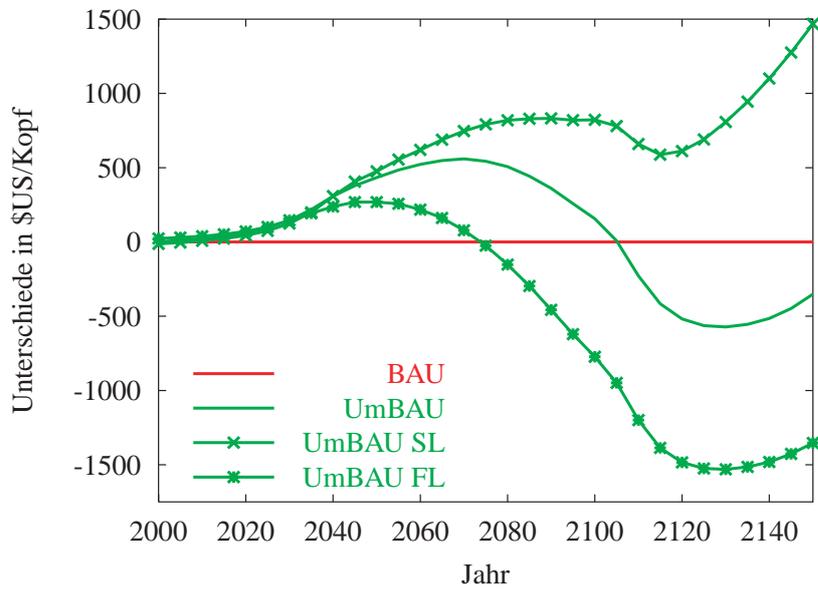


Abbildung 4.14: Durch beschleunigtes Lernen werden die Konsumverluste einer Klimaleitplanke drastisch vermindert.

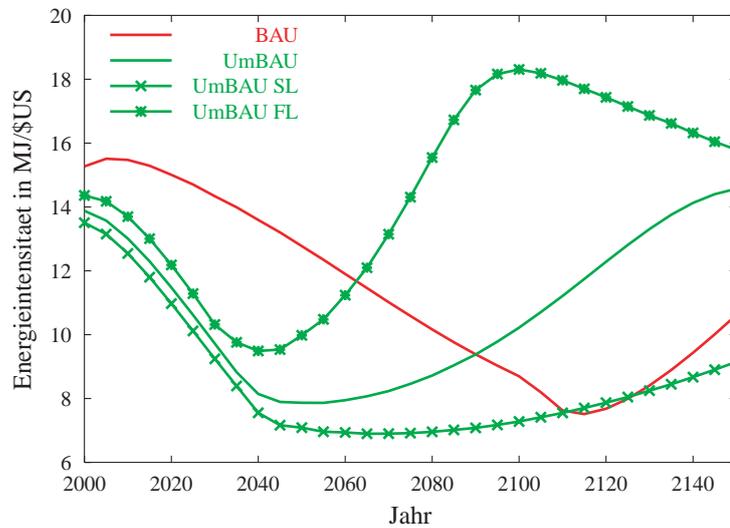


Abbildung 4.15: Je schneller der erneuerbare Energiesektor lernt, umso schneller sinkt auch die Energieintensität

des Schattenpreises des Kapitals wächst. Dies dürfte der sozialen Akzeptanz eines Umbaus zugute kommen. Der Schattenpreis der Emissionen steigt bei einer relativ

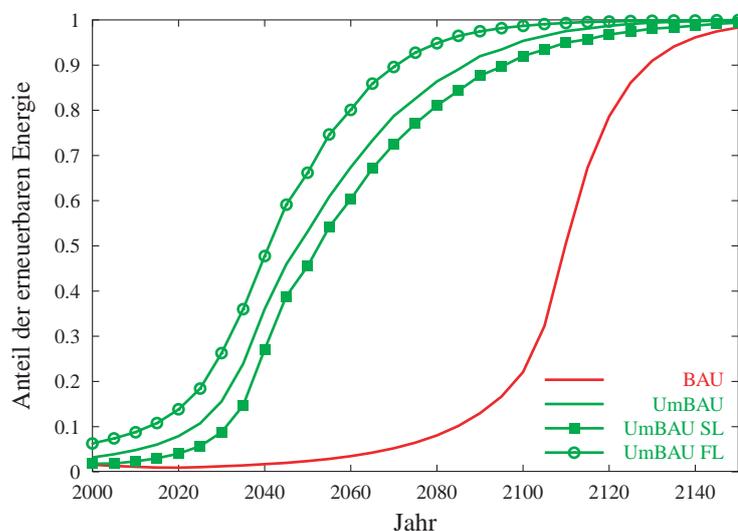


Abbildung 4.16: Je schneller der erneuerbare Energiesektor lernt, umso schneller steigt sein Marktanteil

anspruchsvollen Leitplanke stark an. In verschiedenen vergleichbaren Modellen wird immer wieder darauf hingewiesen, dass der Zertifikatspreis auf 50 bis 100 GtC steigen wird [siehe Jacoby and Ellerman, 2002], wenn die Kyoto Ziele erreicht werden sollen. Um eine Vergleichbarkeit zu unseren Szenarien herzustellen, ist es wichtig, dass der Zertifikatspreis oder die Steuer auf eine Gt Kohlenstoff in unserem Modell dem Nettoschattenpreis der Emissionen entspricht. Dieser Nettoschattenpreis ergibt sich aus der Subtraktion des Schattenpreises im BAU Szenario vom Schattenpreises im UmBAU Szenario.

Der Schattenpreis der Emissionen im BAU Szenario ist ja nicht Null, da die fossilen Ressourcen ökonomisch knapp sind. Führt man eine Emissionsbeschränkung oder eine Temperaturschranke ein, würde sich ein Zertifikatspreis in der Höhe des Nettoschattenpreises ergeben. Wir kommen für diesen Fall auf ein Maximum von 200 Dollar pro GtC. Angesichts der angestrebten Klimaschranke ist dies nicht hoch (siehe auch Kapitel 5).

Wir haben uns bisher mit dem Hinweis begnügt, der technische Fortschritt führe über die Lernkurven dazu, die Opportunitätskosten der Klimaleitplanke zu vermindern und schließlich den Schattenpreis der Emissionen zu senken. Wir wollen nun die ökonomische Mechanik dieses Umbauprozesses genauer darstellen; erst auf dieser Grundlage wird es uns gelingen, dieses Szenario in seinen Chancen und Risiken

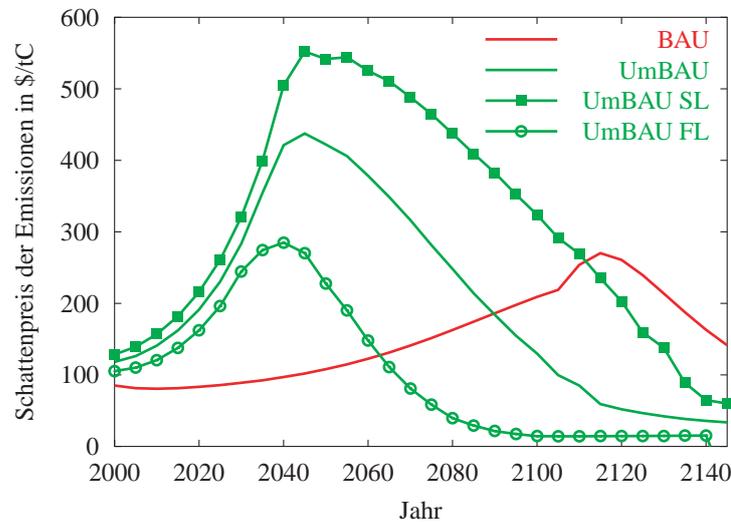


Abbildung 4.17: Der Schattenpreis der Emissionen im UmBAU Szenario

angemessen zu würdigen.

Jede technische Neuerung ist auch eine kreative Zerstörung. Die Erhöhung der Produktivität im Sektor der erneuerbaren Energien zerstört den Wert der Eigentumsrechte der Besitzer von Kohle, Öl und Gas. Die Besitzer des fossilen Kapitalstocks werden durch den technischen Fortschritt im Sektor der erneuerbaren Energieträger enteignet (siehe Abbildung 4.18). Diese Entwertung der Eigentumsrechte ist umso massiver, je stärker das Lernpotential und die Lerngeschwindigkeit ist. Die volkswirtschaftlichen Opportunitätskosten der fossilen Ressourcen steigen durch die Lernkurveneffekte. Diesen sinkenden Renteneinkommen stehen jedoch steigende Renteneinkommen im Sektor der erneuerbaren Energien gegenüber; die Reallokation des gesamten Investitionsbudgets erhöht den Pro-Kopf-Konsum.

Die steigenden Skalenerträge im Sektor der erneuerbaren Energien reduzieren sowohl den Energiepreis als auch die Wohlfahrtsverluste drastisch. Die Vorgabe einer klimapolitischen Leitplanke beschleunigt einen Strukturwandel, der im BAU-Szenario ebenfalls eintreten würde - allerdings wesentlich langsamer.

Entscheidend ist jedoch das Verhältnis des Kapitalkoeffizienten im fossilen zu dem des erneuerbaren Sektors. In Abbildung 4.19 zeigen wir die Lernkurven, wie sie in der empirischen Literatur verwendet werden und wie sie sich endogen aus MIND ergeben. Die daraus resultierende Kostendegression ist durchaus plausibel.

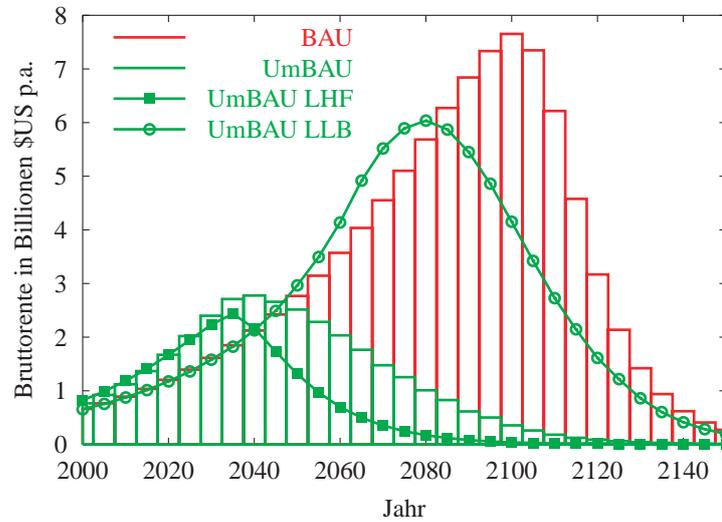


Abbildung 4.18: Die Eigentumsrechte bzw. die Ressourcenrenten erodieren

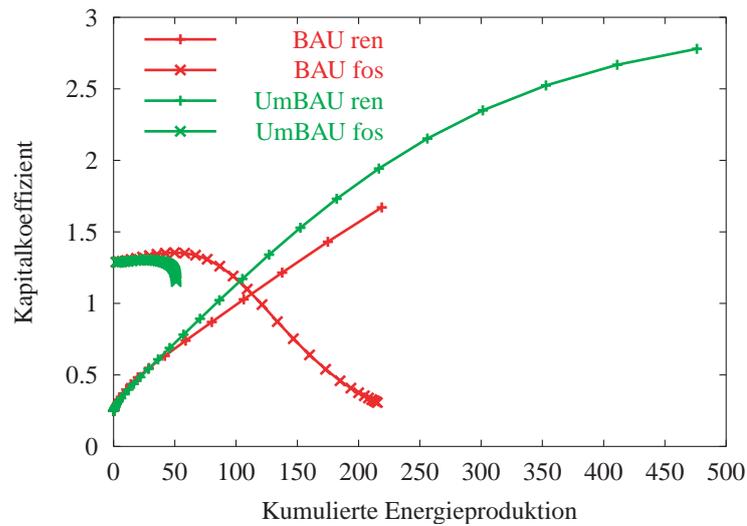


Abbildung 4.19: Die Verminderung des Kapitalkoeffizienten in Abhängigkeit von der kumulierten Ausbringungsmenge

4.3.2 Der Einfluss der Ressourcenbasis

Bereits in den einleitenden Bemerkungen hatten wir darauf hingewiesen, dass es kein Ressourcenproblem gibt, sondern in erster Linie ein Senkenproblem. Diese Feststellung, bei aller Unsicherheit in der Einschätzung der Ressourcenbasis, wird von vielen

Beobachtern geteilt. Meist wird jedoch vernachlässigt, dass eine Veränderung der Ressourcenbasis bzw. ein technischer Fortschritt im Extraktionssektor die Kosten des Umbaus erheblich erhöhen wird und damit auch die Wohlfahrtsverluste steigert.

So zeigt Abbildung 4.20, dass ein erhöhter Fortschritt im Extraktionssektor die Renten der Besitzer fossiler Ressourcen nicht erhöht, falls diese mit einer Klimaleitplanke konfrontiert sind.

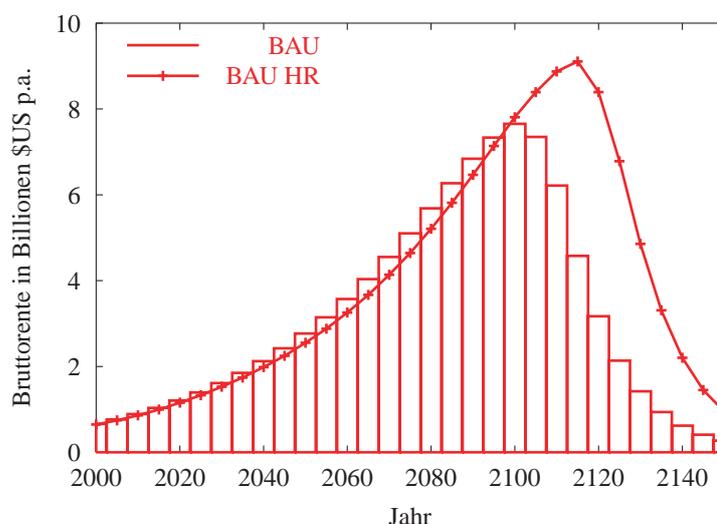


Abbildung 4.20: Die Renten der Ressourcenbesitzer lassen sich durch die Forcierung des technischen Fortschritts im Extraktionssektor steigern, wenn es keine Klimaleitplanke gibt

Allerdings erhöhen sich damit die Opportunitätskosten der Klimaleitplanke. Warum? Die produzierten Einheiten erneuerbarer Energien werden - relativ zu den fossilen - teurer. Da die fossilen Ressourcen im Boden bleiben müssen, um die Klimaleitplanke einzuhalten, können sie nicht für den Produktionsprozess genutzt werden. Je stärker der technische Fortschritt im Bereich der Extraktion ist, um so teurer wird - verglichen mit einem BAU Szenario - eine Klimaschutzpolitik.

Wenn aber ein Klimaschutzziel erreicht werden soll, ist dieser technische Fortschritt im Extraktionssektor (bzw. die Investitionen in Forschung und Entwicklung in diesem Sektor) aus Sicht der Gesamtgesellschaft irrational, da er wirkungslos bleibt. Abbildung 4.21 zeigt, dass die beiden Kurven genau übereinander liegen. Die Ressourcenbesitzer werden daher nach Möglichkeiten suchen, die Klimaschutzschränken zu umgehen; dies werden wir in Abschnitt 4.5 diskutieren.

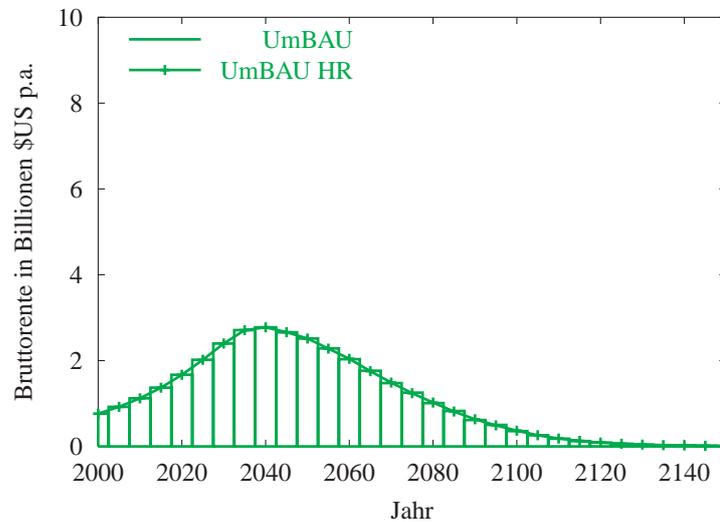


Abbildung 4.21: Bei Einführung einer Klimaleitplanke hat der höhere technische Fortschritt im Extraktionssektor keine Wirkung

4.3.3 Klimasensitivität

Die Einbeziehung der ATHG erzeugt einen zusätzlichen Druck auf den klimapolitischen Handlungsspielraum. Abbildung 4.23 zeigt den BAU-Pfad, der keiner Leitplanke genügt. Das Szenario **LHF** geht von einem großen Klimafenster aus (**L**arge), setzt eine hohe Klimasensitivität voraus (**H**igh; 4.8 Grad Celsius) und friert die Emissionen der ATHG auf das Basisjahr 2000 ein (**F**reeze). Das Szenario **LLB** geht ebenfalls von einem großen Klimafenster aus (**L**), setzt eine geringe Klimasensitivität voraus (**l**ow) und nimmt das **B2**-Szenario für die ATHG an.

Abbildung 4.22 zeigt, dass der Druck auf den Umbau des Energiesystems bei hoher Klimasensitivität zunimmt. Allerdings ist für UmBAU LHF und LLB nur noch das große Klimafenster erreichbar. Das UmBAU Szenario erlaubt ein mittleres Klimafenster da hier eine mittlere Klimasensitivität (2.8 Grad Celsius) angenommen wird, und die ATHG auf das Basisjahr 2000 eingefroren werden. Diese Annahme ist keineswegs unproblematisch, weil hier vorausgesetzt wird, dass etwa in der Vermeidung von Methan kein technischer Fortschritt wirksam werden kann, der das Niveau unter das des Basisjahres drücken könnte. Da wir hier nicht mit hochaggregierten Vermeidungskostenfunktionen hantieren wollen, muss vor allem der der Landwirtschaftssektor endogen modelliert werden; eine Aufgabe, die wir erst nach

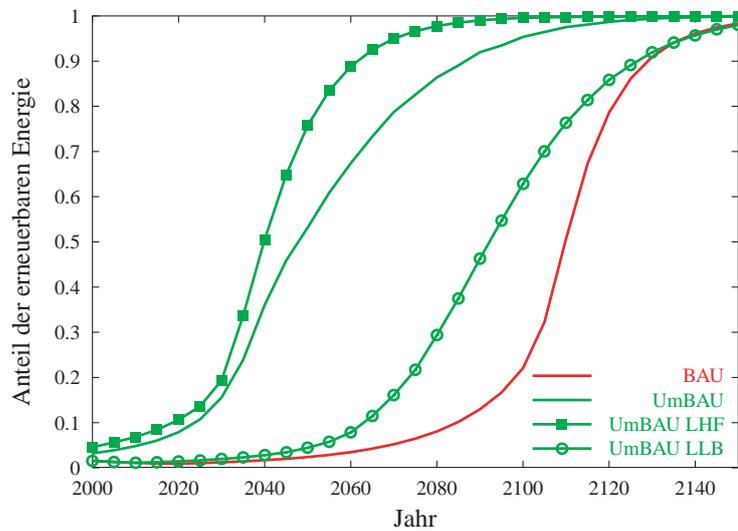


Abbildung 4.22: Umbau des Energiesystems und Klimasensitivität

der Erstellung dieses Berichtes in Angriff nehmen können.

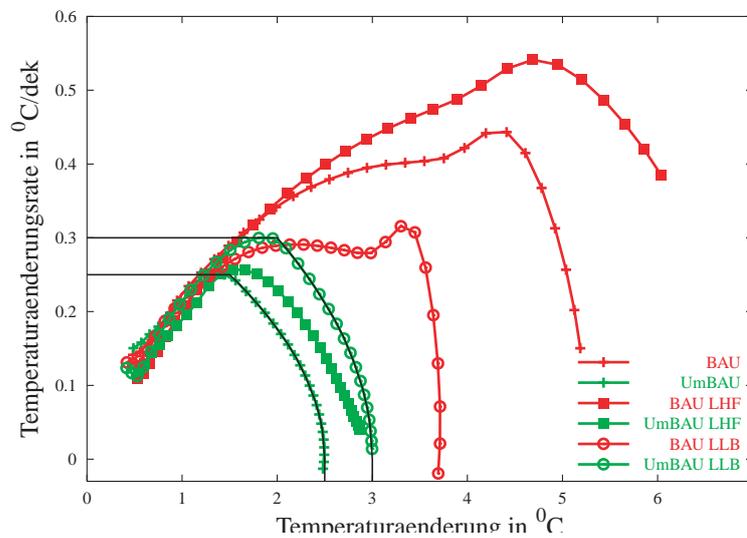


Abbildung 4.23: Temperaturfenster und Klimasensitivität

In Abbildung 4.24 werden die verschiedenen Emissionsverläufe gezeigt. Es zeigt sich auch, dass das UmBAU LLB Szenario ein wenig ehrgeiziges Szenario ist; in manchen SRES Szenarien wird dies als BAU-Szenario ausgewiesen. Die Klimasensitivität ist einer der entscheidenden Parameter für den UmBAU des Energiesystems.

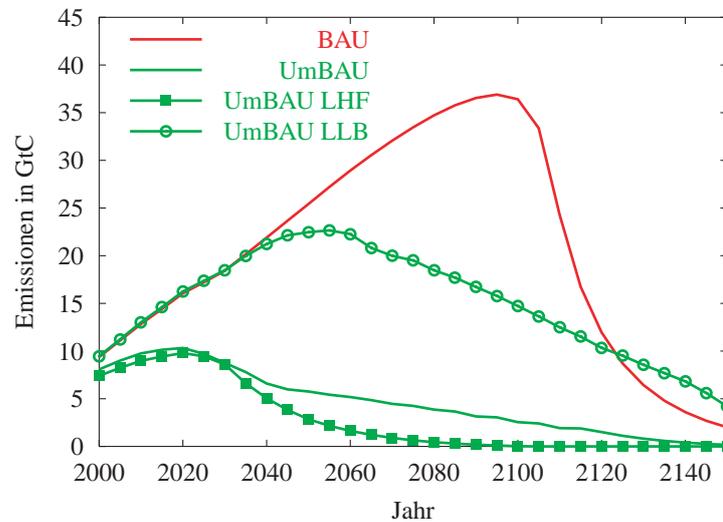


Abbildung 4.24: Emissionsverlauf und Klimasensitivität

Dabei kommt eine niedrige Klimasensitivität dem Steuerungsoptimismus des sozialen Planers durchaus entgegen - hier kann er an den Rand des Klimafensters gehen (siehe Abbildung 4.23). Bei hoher Klimasensitivität wird er die Emissionen wesentlich vorsichtiger steuern. Darüber hinaus haben unsere Modellrechnungen ergeben, dass das ursprüngliche WBGU Fenster nur bei geringer Klimasensitivität erreichbar ist; bereits bei einer mittleren Klimasensitivität wird es verlassen.

Es zeigt sich, dass der Handlungsdruck entscheidend von der Klimasensitivität abhängt. Die Frage ist, ob die Handlungsmöglichkeiten dem Handlungsdruck entsprechen. Es könnte durchaus sein, dass der technische Fortschritt im erneuerbaren Sektor nicht ausreicht, um den durch die Klimasensitivität erzeugten Handlungsdruck zu entsprechen. Um so wichtiger werden Optionen, die ein „to buy time“ ermöglichen. Die Sequestrierung von CO₂ in geologischen Formationen ist eine der wichtigsten Optionen, die in der Second Commitment Period eine entscheidende Rolle spielen wird.

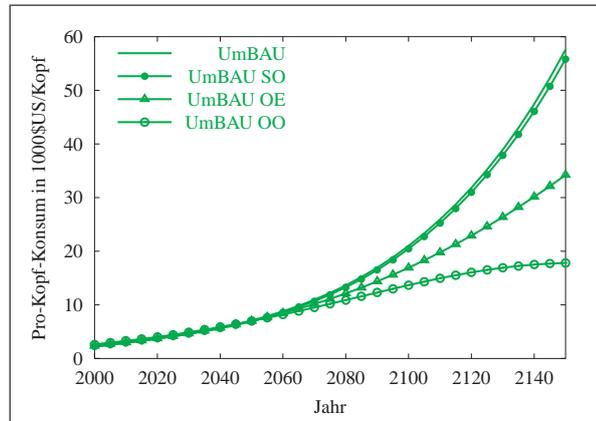


Abbildung 4.25: Die Erhöhung der Energieeffizienz reicht aus, um ein dauerhaftes Wachstum zu ermöglichen, allerdings bei erheblichen Wachstumseinbußen gegenüber dem BAU-Pfad

4.4 Szenario EFFIZIENZ: Klimaschutz durch Steigerung der Energieeffizienz

In diesem Abschnitt stellen wir die Frage, ob es ausreichen würde, die Effizienz des fossilen Energiesystems zu steigern, wenn es keine Substitutionsmöglichkeiten oder nur sehr eingeschränkte Substitutionsmöglichkeiten gäbe. Es stellt sich nämlich erstens die Frage, ob überhaupt ein dauerhaftes Wachstum möglich ist, und zweitens, wie hoch die Opportunitätskosten der Klimaschranke sind.

Wie Abbildung 4.25 zeigt, ist die Erhöhung der Energieeffizienz ausreichend, um ein dauerhaftes Wachstum zu ermöglichen. Es bleibt also für den Rest dieses Jahrhunderts lohnend, in die Erhöhung der Energieeffizienz zu investieren. Die Energieeffizienz muss sich in einem Zeitraum von 100 Jahren mehr als ver Hundertfachen; dieses Szenario geht damit weit über den Faktor 4 oder Faktor 10 hinaus, der in den Vorstellungen von von Weizsäcker et al. [1997] und Schmidt-Bleek [1998] eine Rolle spielt.

Die Frage nach den Opportunitätskosten des Wachstums ist keineswegs trivial. Denn es geht hier schlicht um die Frage, wieviel Wachstumsverzicht eine Klimaleitplanke verlangt; angesichts des politischen und moralischen Dilemmas der Klimapolitik ist diese Frage keineswegs unberechtigt. Es zeigt sich sehr deutlich, dass ein Szenario, das nur auf Effizienzrevolution baut, erhebliche Wachstumsverzichte

gegenüber einem BAU-Szenario verlangt (siehe Abbildung 4.25).

Sowohl Grubb als auch Lovins sind der Auffassung, dass die Wissensgesellschaft ein großes Potential für eine erhöhte Effizienzrevolution zu mobilisieren gilt. In Deutschland ist diese Position durch von Weizsäcker et al. [1997] prominent geworden. Autoren wie Weizsäcker, Lovins oder Grubb [1990] sind auch zur Schlussfolgerung gelangt, dass die Energieproduktivität stärker forciert werden sollte als etwa die Arbeits- oder Kapitalproduktivität.

Diese Auffassung hat bei Ökonomen heftigen Widerspruch hervorgerufen, der zur Formulierung des Khazzom-Brooks Postulats geführt hat [Khazzoom, 1980, Brookes, 1990, Saunders, 1984, 1992, Sutherland, 1994, 1996]: Dieses Postulat besagt, dass die Erhöhung der Energieeffizienz auf der Firmenebene zu einem Anstieg des gesamtwirtschaftlichen Energieverbrauchs führt. Mit anderen Worten - die einzelwirtschaftliche Ingenieursvernunft produziert gesamtwirtschaftliche Unvernunft. Dieses Postulat geht auf Stanley Jevons zurück, der bereits 1865 argumentiert hat, dass die Effizienzsteigerung in der Kohleförderung zu einem steigenden Kohleverbrauch geführt hat. Die Effizienzgewinne der Ingenieure werden also in zusätzliches Wachstum umgesetzt. Khazzoom [1980] und Brookes [1990] wiederholen damit ein Argument, das bereits den Maschinenstürmern des 19. Jahrhunderts entgegengehalten wurde. Die Maschinenstürmer waren nämlich der Auffassung, dass die ständige Steigerung der Arbeitsproduktivität durch Rationalisierung zu einem sinkenden Arbeitsvolumen führen müsse. Das gesamtwirtschaftliche Arbeitsvolumen in den letzten hundert Jahren ist jedoch in den meisten OECD-Staaten leicht gestiegen (siehe Scott [1989]). Es scheint so, als sei damit das Szenario einer Effizienzrevolution vollständig diskreditiert.

Diese Kontroverse bedarf einiger Präzisierungen, die in dem hier entwickelten Modellrahmen auch vorgenommen werden können. In der Tat sprechen die historischen Daten [Saunders, 1992] gegen jene, die in der Effizienzrevolution den Weg für eine künftige Energiepolitik sehen: Sowohl die Energieproduktivität als auch der Energieverbrauch sind gestiegen (siehe auch die Diskussion über die stilisierten Fakten in Abschnitt 4.2.1). Der Grund liegt in der Wirkung eines faktorvermehrenden technischen Fortschritts: Steigen die Effizienzeinheiten für Energie (durch vermehrte Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen), so wird - je nach Substitutionselastizität - Arbeit und Kapital durch Energie substituiert, da Energie relativ reichlicher vorhanden ist. Da die Substitutionsmöglichkeiten begrenzt sind, werden

Arbeit und Kapital zum relativ knappen Faktor, wodurch wiederum der Lohn und der Schattenpreis des Kapitals gegenüber dem Energiepreis steigen; dadurch werden Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen in die Erhöhung der Arbeitseffizienz rentabel, was wiederum zu einem Anstieg der Arbeitsproduktivität führt. Dadurch steigt das Sozialprodukt und netto auch der Energieverbrauch. Das ist offensichtlich die Wirkungskette, die denen vor Augen steht, die behaupten, alle Effizienzgewinne würden in Wachstum umgesetzt. Historisch ging diese Entwicklung wie beschrieben vonstatten - das lässt sich kaum bestreiten; aber es handelt sich hier nicht um ein ehernes Gesetz, sondern vielmehr um einen historisch kontingenten Zusammenhang.

In den historischen Zeitreihen zeigt sich eine Verzerrung zwischen den Fortschrittsraten der Arbeits- und Energieeffizienz. Wie bereits in der Diskussion der stilisierten Fakten gezeigt wurde, steigt die Arbeitsproduktivität schneller als die Energieeffizienz. Dies zeigt sich in MIND im BAU-Pfad.

Der Grund liegt darin, dass es sowohl aus gesamtgesellschaftlicher als auch aus einzelwirtschaftlicher Perspektive rentabler ist (und historisch war), die Arbeitsproduktivität anstatt der Energieproduktivität zu erhöhen, da Energie relativ reichlicher vorhanden war als Arbeit. Soll der Pro-Kopf Konsum maximiert werden, lohnt es sich, die Produktivität des relativ knappsten Produktionsfaktors zu erhöhen. Die relative Knappheit zwischen Energie und Arbeit wird sich in diesem Jahrhundert unter BAU-Annahmen nicht verändern. Erst zu Beginn des 22. Jahrhunderts wird die Ressourcenknappheit spürbar werden. In diesem Sinne haben die Kritiker der Effizienzrevolution recht - eine Steigerung der Energieeffizienz muss netto keineswegs zu sinkendem Energieverbrauch führen.

Zuzustimmen ist den Kritikern der Effizienzrevolution auch darin, dass eine Erhöhung der Energieeffizienz unter BAU-Bedingungen eine Verschwendung knapper Ressourcen wäre. Denn es würde zuviel Wissenskapital zur Erhöhung der Energieeffizienz aufgebaut werden, und zuwenig zur Erhöhung der Arbeitsproduktivität. Dieser bias des technischen Fortschritts kann also durchaus optimal sein, und eine Abweichung von diesem Optimum als eine Fehllallokation von Mitteln verstanden werden. Für sich gesehen zeitigt die Effizienzrevolution unbeabsichtigte Wirkungen und führt ökonomisch zu einer Fehllallokation der Mittel. Allerdings ändert sich das Bild, wenn man vom BAU-Pfad abweichen will oder muss.

Will man nämlich ein Temperaturfenster erreichen, so dreht sich die Richtung des technischen Fortschritts um: Jetzt steigt die Energieeffizienz schneller als die Ar-

beitseffizienz. Nun wird Energie der relativ knappste Produktionsfaktor, dessen Produktivität maximiert werden muss. Die zunehmend begrenzte Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre für CO₂ rechtfertigt gessamtwirtschaftlich eine Umlenkung knapper Investitionsmittel in eine Erhöhung der Energieeffizienz. Unter diesen Bedingungen ist die Effizienzrevolution durchaus sinnvoll.

Diese Investitionen sind deshalb lohnend, weil eine Emissionsbeschränkung eingeführt wird; die Effizienzrevolution folgt einer politisch gesetzten Emissionsbeschränkung oder der zunehmenden Knappheit der fossilen Ressourcen. Die Hoffnung von Grubb und Lovins, der gesellschaftliche Strukturwandel alleine führe zu einer Niedrig-Emissionsgesellschaft, erweist sich als trügerisch, vor allem weil die Knappheit fossiler Ressourcen erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts zum Tragen kommt. Der gesellschaftliche Strukturwandel hin zu einer erhöhten Energieeffizienz und zu sinkenden Emissionen bedarf politisch gesetzter Emissionsziele.

Dieser Sachverhalt wird oft übersehen: Soll die Wirtschaft nämlich Emissionsziele erreichen, so bedarf die Wirtschaft hierfür bestimmter Knappheitssignale. Zertifikatspreise können solche Signale sein, die das sektorale Investitionsverhalten verändern, und damit auch die Zusammensetzung des Kapitalstocks in den verschiedenen Sektoren.

Unter der Voraussetzung eines Emissionszieles führt eine Erhöhung der Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen in die Energieeffizienz zu Wohlfahrtsgewinnen. Wie Abbildung 4.25 zeigt, ist der Pro-Kopf-Konsum um so größer, je höher die Produktivität des Forschungs- und Entwicklungssektor für Energie ist.

Da auch der Forschungs- und Entwicklungssektor abnehmenden Grenzerträgen unterliegt [Jones and Williams, 1997], ist diese Strategie auf lange Sicht jedoch recht teuer. Die Wachstumsverzichte gegenüber dem BAU-Szenario nehmen im Zeitablauf zu.

Erst wenn die Effizienzrevolution ergänzt wird durch eine Substitutionsstrategie, können die Wachstumsverluste entscheidend vermindert werden. Abbildung 4.25 zeigt, dass die Erfüllung von Klimaleitplanken umso teurer wird, je geringer die Produktivität des Forschungs- und Entwicklungssektors ist. Es kommt also darauf an, die Energieeffizienz zu erhöhen und ausreichend schnell durch „learning by doing“ den erneuerbaren Energiesektor auszubauen. Um diese Strategie soll im nächsten Abschnitt gehen (Abschnitt 4.5).

4.5 BAU + Carbon Sequestration

Der Umbau hin zu einem neuen Energiesystem ist möglich und ökonomisch vernünftig, wenn die erneuerbaren Energien ausreichend Jahren realisieren können (siehe Abbildung 4.26). Wir haben gezeigt, dass unter dieser Voraussetzung die Wohlfahrtsverluste relativ gering sind. Es zeigt sich allerdings auch, dass der Zeitdruck, das Energiesystem umzubauen, relativ groß ist. Der Anteil an der Gesamtenergieproduktion, den die erneuerbaren Energien in den nächsten 20 Jahren erreichen müssten, ist vergleichsweise hoch (50 Prozent bis zum Jahre 2040).

Vor diesem Hintergrund ist es vernünftig, nach Optionen zu suchen, die einen Zeitgewinn versprechen. Die Lagerung von CO₂ in geologischen Formationen ist sicherlich ein vielversprechender Weg. Im Augenblick ist es noch nicht möglich, diese Option in MIND explizit zu berücksichtigen; dies dürfte aber in einigen Monaten möglich sein.

Entscheidend ist jedoch, dass die fossile Energiewirtschaft ein nicht unbeträchtliches Interesse daran haben dürfte, diese Option zu ergreifen.

Kann der fossile Energiesektor durch die Forcierung des technischen Fortschrittes seine Renten verteidigen? Die Antwort: Ist der fossile Sektor nicht mit einer Leitplanke konfrontiert, kann er durch vermehrten technischen Fortschritt im Extraktionssektor seine Renten erhöhen. Sind die Ressourcenbesitzer jedoch mit einer Klimaschranke konfrontiert, können sie auch durch die Erhöhung des technischen Fortschrittes im Extraktionssektor ihre Renten nicht erhöhen. Die Besitzer fossiler Ressourcen sind dazu auch vom technischen Fortschritt des erneuerbaren Sektors bedroht. Je höher die Lerngeschwindigkeit der Erneuerbaren ist, um so niedriger ist ihre Bodenrente. Abbildung 4.26 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Die Abbildung zeigt ebenso den Zusammenhang, dass die Konsumenten nicht vom technischen Fortschritt im Extraktionssektor profitieren, wenn es eine Klimaschranke gibt.

Die Rolle der Ressourcenmärkte und der Ressourcenverfügbarkeit ist für die klimapolitische Entscheidungsbildung von großer Bedeutung: Es zeigt sich, dass bei klimapolitischen Leitplanken ein höherer technischer Fortschritt im Extraktionssektor funktionslos ist, ja sogar schädlich ist, weil hier Ressourcen verschwendet werden, die besser eingesetzt werden könnten. Allerdings wird die Klimaleitplanke umso teurer, je höher der technische Fortschritt im Extraktionssektor ist. Mit anderen Worten:

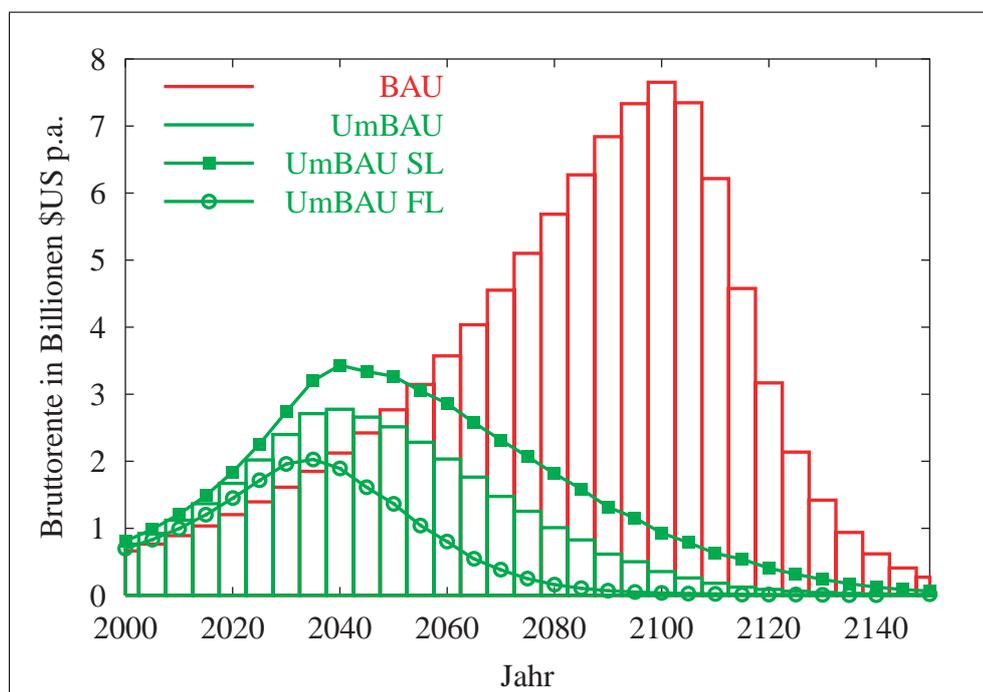


Abbildung 4.26: Die Ressourcenbesitzer können durch den technischen der Erneuerbaren enteignet werden, wenn sie mit einer Klimaschranke konfrontiert sind

Der Sektor der erneuerbaren Energien kann durch Lernkurveneffekte die Wohlfahrtsverluste wieder vermindern. Angesichts einer Klimaleitplanke, implementiert etwa durch ein System handelbarer Zertifikate, kann der Extraktionssektor seine Renten nur noch durch Einfangen und Verklappung und/oder Deponierung von CO₂ erhalten. Durch Geo-Engineering könnte der fossile Energiesektor auch angesichts eines Zertifikatssystems zu einem „fast learner“ werden. Aus gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Perspektive sollte der technische Fortschritt im Extraktionsbereich nicht weiter forciert werden. Der klimapolitische Handlungsbedarf wird umso größer, je höher der technische Fortschritt im Extraktionssektor ist; die Opportunitätskosten der Klimapolitik sind umso höher, je größer der technische Fortschritt im Extraktionssektor (und je kleiner er im Sektor der erneuerbaren Energien) ist. Die Lagerung von CO₂ in geologischen Formationen kann sowohl den Zeitdruck für den Umbau des Energiesystems, als auch die Opportunitätskosten der Klimaschutzpolitik vermindern.

Kapitel 5

Klimaschutz nach Kyoto

In Kap. 4 haben wir gezeigt, dass eine Transformation des Energiesystems von fossilen zu erneuerbaren Quellen zu einer drastischen Reduktion der CO₂-Emissionen im 21. Jahrhundert führen kann, ohne dass dabei hohe Wohlfahrtsverluste entstehen müssen. Die Robustheit der Weltwirtschaft gegenüber den Anforderungen des Klimaschutzes gründet sich vor allem auf zwei Faktoren:

- Die Investitionen werden frühzeitig in den Aufbau des erneuerbaren Sektors gelenkt. Gleichzeitig werden die Investitionen aus dem fossilen Sektor abgezogen.
- Das Potential der erneuerbaren Quellen und die Geschwindigkeit der steigenden Skalenerträge sind hoch genug, um eine vollständige Transformation des Energiesystems in diesem Jahrhundert zu ermöglichen.

Für den Klimaschutz mit energiepolitischer Weitsicht kommt der Lenkung von Investitionsströmen eine zentrale Rolle zu. In Kap. 4 haben wir die Anforderungen des Klimaschutzes durch ein Klimafenster modelliert, dass intolerable Anstiege der globalen Mitteltemperatur und intolerable Temperaturänderungsraten aus dem Raum möglicher Zukünfte des Ökonomie-Klima-Systems ausschließt. Die Setzung einer solchen Klimaleitplanke hat den frühzeitigen Aufbau des erneuerbaren Sektors durch eine entsprechende Lenkung der Investitionsströme *induziert*.

Diese aus volkswirtschaftlicher Sicht optimale Investitionspolitik führt zu optimalen Emissionspfaden. Aufgrund der Dualität der Optimierung ergibt sich daraus

zugleich ein Zeitpfad für den optimalen Schattenpreis. Jede Klimaleitplanke lässt sich grundsätzlich in einen Emissionspfad und in einen Preispfad für die Emissionen übersetzen. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass eine internationale Behörde einen solchen Emissionspfad durchsetzen kann, selbst wenn er mit einiger Sicherheit berechnet werden könnte. Diese Behörde müsste nämlich in der Lage sein entweder den Steuersatz für eine CO₂-Steuer kontinuierlich zu verändern, oder aber sie müsste Zertifikate ausgeben. Mit anderen Worten, eine solche Behörde müsste über erhebliche diskretionäre Spielräume verfügen. Das Steuerproblem wäre dem einer Zentralbank nicht unähnlich; die Erfolge der Zentralbankpolitik in der Inflationsbekämpfung beruhen jedoch darauf, dass der diskretionäre Spielraum der Zentralbanken beschränkt ist. Wir werden daher fragen, ob nicht einfache Emissionsgrenzen genügen könnten, um der Zielsetzung des Klimaschutzes und des Wirtschaftswachstums gleichermaßen Rechnung zu tragen.

In Kap. 5.1 und 5.2 stellen wir uns zunächst die Frage, welchen Spielraum ein gegebenes Klimafenster der zukünftigen Entwicklung noch lässt. Zu diesem Zweck betrachten wir den verbleibenden Spielraum für die CO₂-Emissionen der fossilen Energiewirtschaft im 21. Jahrhundert. Ein solcher Emissionskorridor vermittelt eine Anschauung für den Handlungsspielraum einer auf Klimaschutz ausgerichteten Politik. Insbesondere untersuchen wir die Frage, wann es bei gegebenen Leitplanken frühestens zu einer Transformation des Energiesystems kommen kann und wann sie spätestens abgeschlossen sein muss.

Die diskretionäre Feinsteuerung des Schattenpreises oder der Emissionen scheint uns aus institutionellen Gründen unmöglich; diese Einschätzung teilen wir mit den Vertretern der Politischen Ökonomie. In Kap. 5.3 diskutieren wir daher die institutionellen Restriktionen und gehen davon aus, dass nur Emissionsgrenzen festgelegt werden können, die dann für unterschiedlich lange Zeiträume gelten. Wir werden zeigen, dass dieses Verfahren ausreicht, um einen ökonomisch verträglichen Klimaschutz zu realisieren, wie er in Kapitel 4 diskutiert wurde. Dieses Verfahren ist kompatibel mit dem Kyoto-Protokoll und ließe sich in der 2nd Commitment Period durchaus implementieren.

In Kap. 5.4 diskutieren wir anhand der Ergebnisse aus Kap. 5.3 die wichtigsten Faktoren, die die Klimaschutzwirksamkeit und volkswirtschaftliche Vertretbarkeit von Emissionsbeschränkungen beeinflussen. Es zeigt sich, dass Emissionsziele, die

glaubhaft angekündigt werden, die Erwartungen der Investoren stabilisieren, was zu einem rechtzeitigen Umbau des Energiesystems führt. Darüberhinaus ist das Potential der erneuerbaren Energiequellen sowie die Geschwindigkeit der steigenden Skalenerträge auf diesem Sektor von großer Bedeutung, sowohl für den Schattenpreis der Emissionen als auch auf dem Wachstumspfad des Pro-Kopf-Konsums. Vor diesem Hintergrund diskutieren wir eine kombinierte Zertifikats- und CO₂-Steuer-Strategie, in der die Steuer als volkswirtschaftliches *Sicherheitsventil* bei zu stark steigenden Schattenpreisen aufgrund der Emissionsbeschränkung fungiert.

5.1 Leitplanken des Handlungsspielraums

Zur Bestimmung von Entwicklungs- und Handlungsspielräumen eignet sich der sogenannte *Politikleitansatz*, der von normativ zu setzenden Grenzen (*Leitplanken*) für die Belastung durch Klimaschäden und Klimaschutzmaßnahmen ausgeht, und den damit verträglichen klimapolitischen Spielraum in den Mittelpunkt der Analyse stellt. Die wichtigsten Vertreter dieses Ansatzes sind die sogenannte *Safe Landing Analysis* [Alcamo and Kreileman, 1996] und der *Tolerable Windows Approach (TWA)* [Tóth et al., 1997, Petschel-Held et al., 1999, Bruckner et al., 1999], der 1995 vom Wissenschaftlichen Beirat Globale Umweltveränderungen vorgeschlagen wurde [WBGU, 1995]. In der vorliegenden Analyse benutzen wir die im Rahmen des TWA entwickelte Methode zur Berechnung von Emissionskorridoren [Leimbach and Bruckner, 2001], um den Handlungsspielraum bei der Transformation des Energiesystems auszuleuchten.

5.1.1 Zur Interpretation des Tolerable Windows Approach

Zwischen dem TWA und einer klassischen Kosten-Nutzen- bzw. Kosteneffektivitätsanalyse (KNA), wie sie in Kapitel 4 durchgeführt wurde, bestehen wichtige Unterschiede. Der folgende Vergleich zeigt, dass die mit den beiden Ansätzen verknüpften Herangehensweisen in vielerlei Hinsicht komplementär sind.

1. **Spielraum für verträgliche Klimaschutzstrategien vs. optimaler Klimaschutzpfad:** Der TWA bietet keine eindeutige Klimaschutzstrategie als optimale Lösung an, sondern versucht, das Bündel der mit den Leitplanken verträglichen Strategien zu bestimmen. Ein Beispiel für die vereinfach-

te Darstellung solcher Bündel sind Emissionskorridore. Sie stellen die Menge aller Emissionswerte in der Zeit dar, die von mit den Leitplanken verträglichen Emissionspfaden erreicht werden können. Die mengenwertige Darstellung betont den mit den Leitplanken verknüpften Handlungsspielraum gegenüber dem Entscheidungsträger. Sie liefert allerdings keine Bewertung von möglichen Strategien innerhalb des Spielraums. In diesem Sinne führt der TWA zu einer Unterbestimmung von Politikoptionen. Die KNA blendet dagegen durch die Benutzung eines Optimierungskalküls die Menge der vertretbaren Klimaschutzstrategien aus. Sie führt in diesem Sinne zu einer Überbestimmung von Politikoptionen. Während dem Entscheidungsträger im Rahmen des TWA also nicht gesagt werden kann, welcher konkrete Pfad gewählt werden soll, kann der Entscheidungsträger in der KNA nicht erkennen, welche - mitunter massiven - Konsequenzen sich bei einer kleinen Abweichung vom optimalen Pfad ergeben können.

- 2. Multikriterielle Ausschlussbedingungen vs. skalare Zielfunktion:** Die im Rahmen des TWA zu setzenden Leitplanken können für beliebige Zustandsvariablen bzw. beliebige von den Zustandsvariablen abhängige Bewertungsfunktionen gesetzt werden. Durch den Ausschlusscharakter der Leitplanken entfällt die normativ unauflösbare Frage der Aggregation über verschiedene Bewertungskategorien, die bei der Bestimmung einer Nutzenfunktion zu beantworten ist. Eine Klimaschutzstrategie ist genau dann zulässig, wenn sie gleichzeitig alle Leitplanken in allen Bewertungskategorien erfüllt. Diese Auflösung des Aggregationsproblems verlagert allerdings die Kontroverse auf die Bestimmung von Ausschlusskriterien für die einzelnen Bewertungskategorien. Es lässt sich also sagen, dass die normativen Diskussionen im Rahmen des TWA und der KNA auf unterschiedlichen Ebenen geführt werden. Während bei der KNA die Frage der quantitativen Erfassung von aggregierten Kosten und Nutzen im Vordergrund steht, sind beim TWA Grenzen der Tolerabilität auszuloten.

Eine praktische Anwendung des TWA erfordert eine geeignete Interpretation der Leitplanken. Im allgemeinen ist es nicht möglich, eine scharfe Grenze zwischen einem intolerablen und tolerablen Bereich möglicher Zukünfte zu ziehen. Stattdessen existiert eine Grauzone zwischen einer eindeutigen Tolerabilitätsgrenze, die tolerable Zukünfte einschließt, und einer eindeutigen Intolerabilitätsgrenze, die intolerable

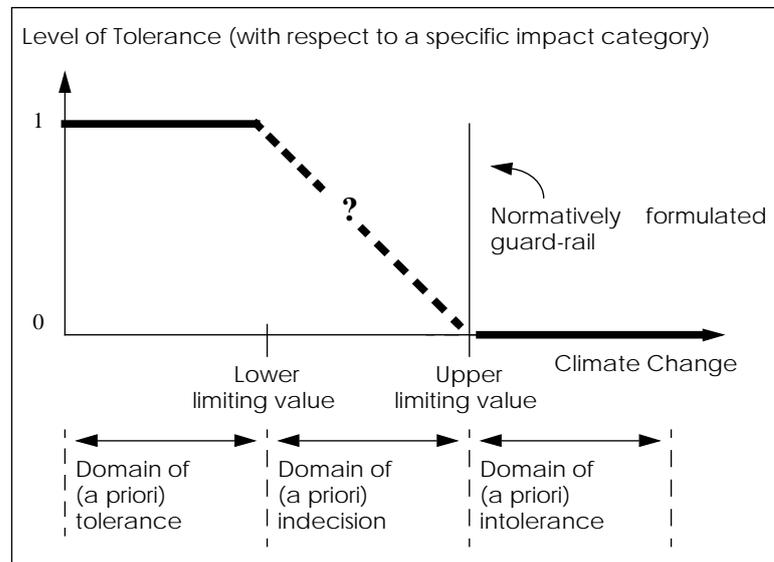


Abbildung 5.1: Leitplankensetzung auf dem Kontinuum des Klimawandels.

Zukünfte ausschließt (s. Abb. 5.1). Methodische und konzeptionelle Gründe legen es nahe, die Leitplanken im TWA als Intolerabilitätsgrenzen zu interpretieren. Dadurch wird der Fokus auf die von Leitplanken ausgeschlossenen Politikoptionen, nicht aber auf die mit den Leitplanken verträglichen Politikstrategien gelegt - ein für die Politikberatung sehr wichtiger Aspekt.

Die konzeptionelle Motivation gründet sich auf der Schwierigkeit, den tolerablen Zukunftsbereich in der Klimafrage vollständig zu umreißen. Dagegen reicht eine unvollständige Spezifizierung des intolerablen Zukunftsbereichs bereits aus, um wichtige Informationen über mögliche Politikoptionen zu bekommen. Strategien, die schon unter einer gegebenen Leitplankensetzung intolerabel sind, werden auch bei Hinzunahme weiterer Leitplanken unzulässig bleiben.

Die methodische Motivation trägt der Tatsache Rechnung, dass eine vollständige Darstellung des Bündels der zulässigen Klimaschutzstrategien weder mathematisch möglich, noch für die Politikberatung sinnvoll ist. Stattdessen können nur zulässige Mengen wie z.B. Emissionskorridore bestimmt werden, die keine Information mehr über die innere Struktur des Pfadbündels enthalten, d.h. welche zwei Punkte durch

einen Pfad verknüpft sind. Daher ist nicht jeder erdenkliche Pfad innerhalb des Korridors mit den Leitplanken verträglich. Es lässt sich lediglich sagen, dass jeder Pfad, der den Korridor verlässt, mit den Leitplanken nicht verträglich ist.

5.1.2 Leitplankensetzung

Zur Einschätzung des Spielraums für CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Ressourcen müssen wir zunächst eine sinnvolle Leitplankenkombination wählen, die die Anforderungen des Klimaschutzes auf der einen Seite und der volkswirtschaftlichen Verträglichkeit auf der anderen Seite fassen kann. Zu diesem Zweck wählen wir die folgenden drei Leitplanken:

1. **Klimaleitplanke:** Die Anforderungen des Klimaschutzes sind bereits in Kapitel 4 durch eine Klimaleitplanke in die Analyse einbezogen worden. Aus Gründen der Vollständigkeit sei sie hier noch einmal im Detail vorgestellt. Die Leitplanke definiert ein Klimafenster für den Anstieg der globalen Mitteltemperatur ΔT und die Temperaturänderungsrate \dot{T} , dass nicht verlassen werden darf. Es hat die folgende funktionale Form [vgl. Petschel-Held et al., 1999]:

$$\Delta T \leq \Delta T_{max} \tag{5.1}$$

$$\dot{T} \leq \dot{T}_{max} \quad \text{für } \Delta T \leq \Delta T_{max} - 1$$

$$\dot{T} \leq \dot{T}_{max} \cdot \sqrt{\Delta T_{max} - \Delta T} \quad \text{für } \Delta T_{max} - 1 \leq \Delta T \leq \Delta T_{max}$$

Im Rahmen dieser Analyse betrachten wir drei verschiedene Fenstergrößen, die jeweils eine unterschiedliche Einschätzung der Resilienz der Natur und/oder des Menschen gegenüber Klimaveränderungen zum Ausdruck bringen.

- **Fall KF2:** $\Delta T_{max} \leq 2^\circ \text{C}$, $\dot{T}_{max} \leq 0.2^\circ \text{C/dek}$
Dieses prominente Fenster wurde in [WBGU, 1995] vorgeschlagen. In einer Betrachtung von Klimaschutzstrategien, die lediglich bzgl. ihres Reduktionspotentials für CO₂ zu spezifizieren sind, können wir aus den in Kapitel 3.1 erläuterten Gründen seine Einhaltung nur für den Fall kleiner Klimasensitivitäten fordern.
- **Fall KF25:** $\Delta T_{max} \leq 2.5^\circ \text{C}$, $\dot{T}_{max} \leq 0.25^\circ \text{C/dek}$

- **Fall KF3:** $\Delta T_{max} \leq 3^\circ \text{C}$, $\dot{T}_{max} \leq 0.3^\circ \text{C/dek}$

2. **Verteilungsleitplanke:** In kapitalistischen Gesellschaften werden Verteilungskonflikte vorrangig durch Wachstum und das damit einhergehende Anwachsen des Pro-Kopf-Konsums gelöst. Angesichts der gegenwärtigen Wohlstandsunterschiede zwischen Industrie- und Entwicklungsländern ist davon auszugehen, dass die daraus resultierenden Verteilungskonflikte vor allem durch schnell wachsenden Volkswirtschaften in den Entwicklungsländern gemildert werden können. Um diesem aus der Verteilungsgerechtigkeit erwachsenden Druck Rechnung zu tragen, führen wir eine Untergrenze für das Anwachsen des Pro-Kopf-Konsums im 21. Jahrhundert in die Analyse ein. Die Wachstumsrate des Pro-Kopf-Konsums \dot{c} pro Jahr muss mindestens betragen:

$$\dot{c} \geq 3\% \quad \text{im Zeitraum 2000-2025}$$

$$\dot{c} \geq 2\% \quad \text{im Zeitraum 2025-2075}$$

$$\dot{c} \geq 1\% \quad \text{im Zeitraum 2075-2100}$$

3. **Verknappungsleitplanke:** Die Produktionsfaktoren Kapital, Arbeit und Energie können im begrenzten Umfang gegeneinander substituiert werden, sobald ein Produktionsfaktor gegenüber den anderen knapp wird. Eine Verknappung z.B. der Energie führt dazu, dass der Einkommensanteil des energieproduzierenden Sektors zunimmt, was sich in steigenden Energiepreisen und einer Substitution von energieintensiven Prozessen durch kapital- oder arbeitsintensive Prozesse niederschlägt. Eine Veränderung der relativen Einkommensverhältnisse von Arbeit, Kapital und Energie ist aber nur in einem begrenzten Maße möglich, da es auch zwischen den Produktionsfaktoren zu Verteilungskonflikten kommen kann. Verfallen zum Beispiel die Einkommen von Arbeit und Kapital durch eine übermäßige Verknappung der Energie, so wird sich der Druck von Investoren und Arbeitnehmern auf eine Verbilligung des Zugangs zur Energie erhöhen. Wenn, wie im unseren Fall, die Energieverknappung durch eine Begrenzung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe hervorgerufen wird, so wird sich dieser Druck auf die Wiedereröffnung der fossilen Ressourcenbasis richten. Eine emissionsbeschränkende Klimaleitplanke kann daher nur durchgesetzt werden, wenn sie nicht zu einer Energieknappheit führt, die die

Einkommen von Investoren und Arbeitnehmern in größerem Umfang verfallen lässt.

Um solch eine sozio-ökonomisch unverträgliche Energieknappheit auszuschließen, führen wir eine Verknappungsleitplanke ein, die die Veränderung des Einkommensverhältnisses zwischen Energie und Kapital auf einen vertretbaren Bereich beschränkt:

$$r_{min} \cdot \left(\frac{\partial Y}{\partial E} / \frac{\partial Y}{\partial K} \right)_{t=1995} \leq \frac{\partial Y}{\partial E} / \frac{\partial Y}{\partial K} \leq r_{max} \cdot \left(\frac{\partial Y}{\partial E} / \frac{\partial Y}{\partial K} \right)_{t=1995} \quad (5.2)$$

r_{min} gibt an, wie stark das marginale Grenzprodukt der Energie gegenüber dem marginalen Grenzprodukt des Kapitals gemessen am heutigen Zustand abnehmen kann, d.h. wieviel billiger Energie werden darf. Durch den Parameter r_{max} wird spezifiziert, wieviel teurer die Energie noch werden kann, ohne dass es zu einem übermäßigen Druck auf die Aufhebung von emissionsbeschränkenden Klimaleitplanken kommt. Für diese Analyse haben wir folgende Werte für die verknappungsbegrenzenden Faktoren gewählt:

$$r_{min} = 0.8 \quad r_{max} = 3$$

Die drei Leitplanken schließen Zukünfte aus, die klimaschädlich und/oder sozio-ökonomisch unverträglich sind. Da wir die Leitplanken als Intolerabilitätsgrenzen interpretieren, bedeutet das keineswegs, dass alle mit den Leitplanken vereinbaren Zukünfte klimaschützend wirken und gesellschaftlich durchsetzbar sind. Trotzdem reicht die in diesem Sinne unvollständige Leitplankensetzung aus, um den Emissionsspielraum bereits beträchtlich einzuschränken. Wir bestimmen diesen Spielraum in Form von Emissionskorridoren, die die Menge aller Emissionswerte in der Zeit darstellen, welche auf mit den Leitplanken verträgliche Weise zu erreichen sind. Die Berechnung der Korridore basiert auf dem in [Leimbach and Bruckner, 2001] vorgestellten Verfahren. Dessen Kernstück ist die Maximierung und Minimierung der Emissionen zu einem festen Zeitpunkt unter Berücksichtigung der Modellzusammenhänge und der vorgegebenen Leitplanken. Eine Wiederholung dieses Vorgehens für verschiedene Zeitpunkte liefert eine Menge von Punkten auf der Ober- und Untergrenze des Korridors. Durch Interpolation zwischen diesen Stützpunkten lässt sich die Korridorgrenze näherungsweise bestimmen.

In Kap. 5.2 werden wir den Emissionsspielraum für verschiedene Kombinationen der oben genannten Leitplanken diskutieren. Darüberhinaus untersuchen wir die Abhängigkeit der Emissionskorridore von der Klimasensitivität. In der Standardeinstellung des Modells MIND benutzen wir eine mittlere Klimasensitivität von $2.8\text{ }^\circ\text{C}$. Darüberhinaus werden wir auch einen Fall niedriger ($T_{2\times\text{CO}_2} = 1.7\text{ }^\circ\text{C}$) und hoher Klimasensitivität ($T_{2\times\text{CO}_2} = 4.2\text{ }^\circ\text{C}$) betrachten. Allerdings können diese Fälle nicht beliebig mit den Klimaleitplanken kombiniert werden, da bei engem Fenster und hoher Sensitivität des Klimas eine Einhaltung des Klimaschutzzieles unmöglich wird (vgl. Kap. 3.1). Wir betrachten fünf Kombinationen, die die Existenz von Emissionskorridoren noch zulassen. Die Kombinationen können auf kompakte Weise durch einen *Klimaimpakt-Resilienzparameter*

$$R_{\text{Impakt}} = \frac{T_{\text{max}}}{T_{2\times\text{CO}_2}}$$

beschrieben werden, dessen Wert ganz wesentlich die Ausdehnung des Korridors bestimmt [Kriegler and Bruckner, 2002]. Es zeigt sich, dass im gegebenen Modellrahmen die Existenz eines Emissionskorridors nur für einen Klimaimpakt-Resilienzparameter oberhalb von 0.7 gesichert ist.

- KF2, $T_{2\times\text{CO}_2} = 1.7\text{ }^\circ\text{C}$ $\rightarrow R_{\text{Impakt}} = 1.18$
- KF25, $T_{2\times\text{CO}_2} = 1.7\text{ }^\circ\text{C}$ $\rightarrow R_{\text{Impakt}} = 1.47$
- KF25, $T_{2\times\text{CO}_2} = 2.8\text{ }^\circ\text{C}$ $\rightarrow R_{\text{Impakt}} = 0.89$
- KF3, $T_{2\times\text{CO}_2} = 2.8\text{ }^\circ\text{C}$ $\rightarrow R_{\text{Impakt}} = 1.07$
- KF3, $T_{2\times\text{CO}_2} = 4.2\text{ }^\circ\text{C}$ $\rightarrow R_{\text{Impakt}} = 0.71$

5.2 Emissionskorridore

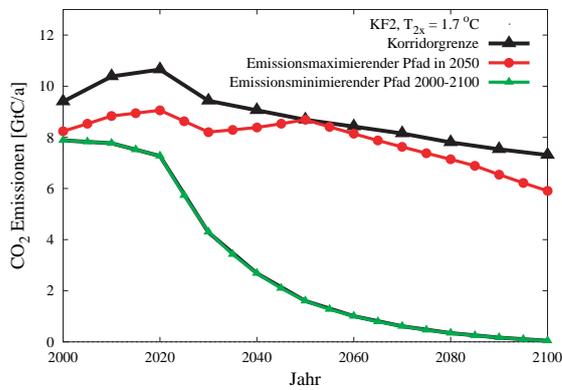
Die anthropogenen CO_2 -Emissionen sind die Schnittstelle zwischen Energie- und Klimasystem. Sie sind damit eine geeignete Größe, um Handlungsspielräume sowohl beim Klimaschutz als auch bei der Transformation des Energiesystems auszuloten. Durch die Vorgabe einer Klimaleitplanke wird klimaschädliches Emissionsverhalten ausgeschlossen. Durch die Vorgabe von Verteilungs- und Verknappungsleitplanken werden CO_2 -Pfade für unzulässig erklärt, die nur durch sozio-ökonomisch unverträgliche Transformationsszenarien auf dem Energiesektor zu erreichen sind. Es

sei hier nochmals hervorgehoben, dass der Ausschluss intolerabler Zukünfte nicht vollständig sein kann. Die Einhaltung der Leitplanken, als Intolerabilitätsgrenzen interpretiert, stellt nur eine *notwendige* Bedingung, keineswegs eine *hinreichende* Bedingung für die Tolerabilität eines Emissionspfades dar. Die Menge aller Emissionspfade, die weder die Klimaleitplanke durchbrechen, noch die Transformation des Energiesystems im Widerspruch mit der Verknappungs- und Verteilungsleitplanke erzwingen wollen, fließen in den Emissionskorridor ein. Der Korridor ist die Menge aller Emissionswerte über die Zeit, die von mit den Leitplanken verträglichen Emissionspfaden überstrichen werden.

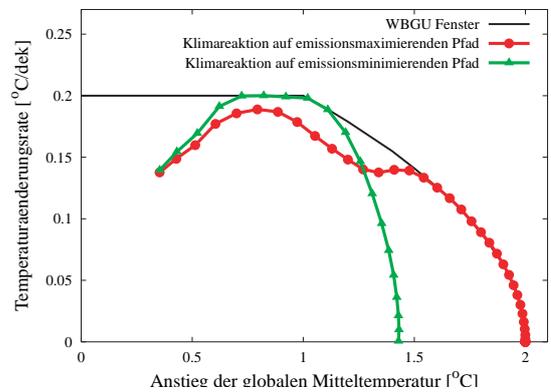
Die ökonomischen Restriktionen sind zwar bindend, die Korridorobergrenze wirkt aber nicht sehr sensitiv auf die Veränderung der ökonomischen Leitplanken. Die ökonomische Mechanik sei beispielhaft an Abbildung 5.2 gezeigt. Wenn der emissionsmaximierende Pfad die Korridorobergrenze erreicht, müssen die Emissionen reduziert werden; dies ist jedoch nur dann vereinbar mit der Leitplanke an den Pro-Kopf-Konsum, wenn einerseits Energie durch Kapital und Arbeit substituiert werden; da dies nicht unbegrenzt möglich ist, muss vermehrt in die Erhöhung der Energieeffizienz investiert werden und schließlich in die erneuerbaren Energien. Die Beschränkung der Substitution von Energie durch Arbeit und Kapital muss hier exogen vorgegeben werden, da im Modus der Korridorrechnungen kein kostenminimales Einsatzverhältnis der Produktionsfaktoren errechnet wird, wie dies im Kosteneffektivitätsmodus der Fall ist.

Da wir mit der Fokussierung auf die Transformation des Energiesystems nur isolierte CO₂-Vermeidungsstrategien als Klimaschutzoption betrachten können, ist die Zahl der Klimafenster, die bei gegebener Klimasensitivität einzuhalten sind, beschränkt (vgl. Kapitel 3.1). Um bei gegebener Klimasensitivität striktere Klimafenster einzuhalten, oder bei gegebenem Fenster robustere Strategien gegenüber der Unsicherheit in der Klimasensitivität zu verfolgen, müssen auch die anderen Treibhausgase in eine Klimaschutzpolitik einbezogen werden. In der vorliegenden Analyse können wir nur exogene Annahmen über die Entwicklung der anderen Treibhausgase machen. Unter der Annahme, dass es dort nicht zu drastischen Reduktionen kommt (Einfrieren der Emissionen auf den Stand des Jahres 2000), können isolierte CO₂-Strategien nur bei Annahme mittlerer bis hoher Klimaimpakt-Resilienzparameter ($R_{\text{Impakt}} \geq 0.7$) zum Erfolg führen.

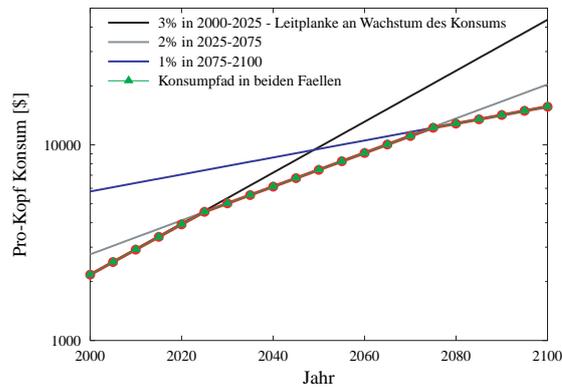
Abbildung 5.3 zeigt die Emissionskorridore für die fünf in Kapitel 5.2 vorgestell-



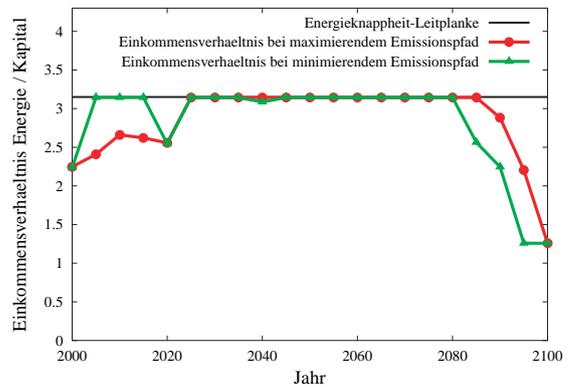
a. Emissionskorridor



b. Klimaleitplanke



c. Verteilungsleitplanke



d. Verknappungsleitplanke

Abbildung 5.2: Begrenzung der Emissionspfade durch die Wahl der Leitplanken am Beispiel des emissionsminimierenden Pfades und des emissionsmaximierenden Pfades im Jahr 2050.

ten Kombinationen aus Klimafenster und Klimasensitivität. Zusätzlich abgebildet sind die korrespondierenden kosteneffektiven Emissionspfade. Sie maximieren ein klassisches intertemporales Wohlfahrtsmaß unter Berücksichtigung der jeweils gegebenen Leitplankenkombination.

- Mit den Korridoren abgebildet sind die kosteneffektiven Emissionspfade, die aus der Maximierung der intertemporalen Wohlfahrt unter Berücksichtigung der jeweils gegebenen Leitplankenkombination ermittelt worden sind. Es zeigt sich, dass die kosteneffektiven Emissionspfade in der oberen Hälfte des Korridors

Fall	Max. kumulative Emissionen [GtC] 2000 - 2100
KF25, $T_{2\times CO_2} = 1.7^\circ C$	1462
KF3, $T_{2\times CO_2} = 2.8^\circ C$	885
KF2, $T_{2\times CO_2} = 1.7^\circ C$	866
KF25, $T_{2\times CO_2} = 2.8^\circ C$	533
KF3, $T_{2\times CO_2} = 4.2^\circ C$	345

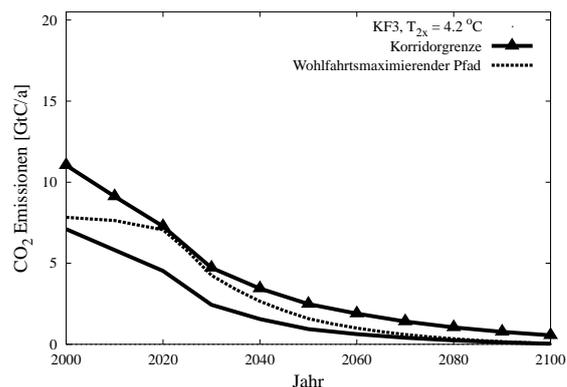
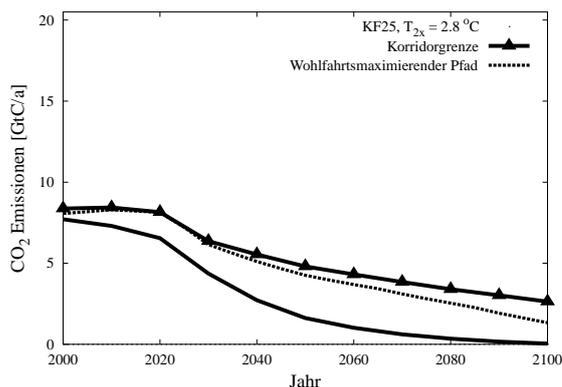
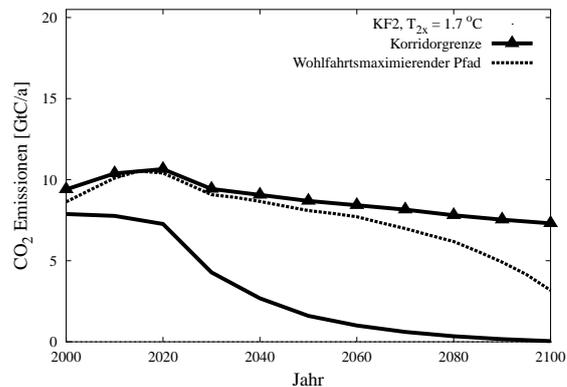
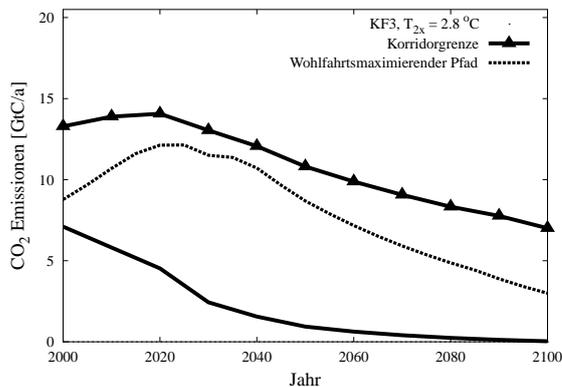
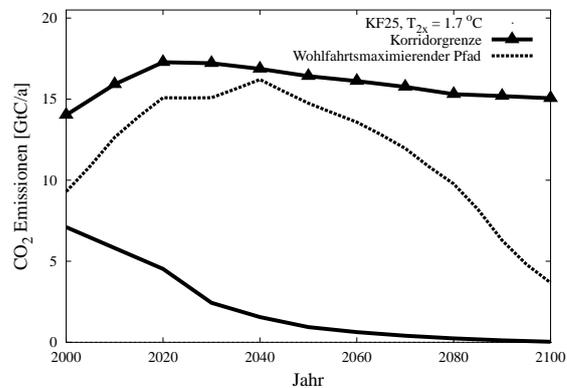


Abbildung 5.3: Emissionskorridore für verschiedene Kombinationen von Klimafenster und Klimasensitivität.

verlaufen, und über längere Zeiträume der Obergrenze des Korridors nahekommen. Der durch das Klimafenster verbleibende Emissionsspielraum wird voll ausgeschöpft. Dies hebt die komplementäre Interpretation der Klimaleitplanken im TWA- und Kosteneffektivitätsfall hervor. Während beim TWA die Leitplanken als Intolerabilitätsgrenzen zu interpretieren sind, müssen sie in der Kosteneffektivitätsanalysen als Tolerabilitätsgrenzen verstanden werden, da ansonsten die Klimaschutzwirksamkeit des kosteneffektiven Pfades in Frage steht.

- Die Korridorobergrenze ist sehr sensitiv auf die Kombination von Klimaleitplanke und Klimasensitivität. Dies ist bereits an der in Abbildung 5.3 zu sehen. Die Obergrenze wird durch die kumulierten Emissionen bestimmt (siehe Tabelle in Abbildung 5.3). Je größer die Klimasensitivität ist, um so kleiner wird der Korridor.
- Die Korridoruntergrenze wird im Gegensatz zur Obergrenze von einem einzigen Emissionspfad abgefahren, der die kumulativen Emissionen bis zum Jahr 2100 minimiert. Die Untergrenze wird durch den Einfluss der Aerosole bestimmt; die Emissionen können nämlich nicht beliebig reduziert werden, da der Rückgang der Aerosole einen sofortigen Rückgang ihres Kühlungseffektes zur Folge hat; die geringere Erwärmung durch die Treibhausgase tritt erst mit einer gewissen Zeitverzögerung ein, so dass durch die Dynamik des Temperaturgradienten das Klimafenster verletzt werden könnte.

Die Unter- und Obergrenze des Korridors bestimmen damit den Zeitpunkt der Transformation des Energiesystems. Die Untergrenze wird durch den unteren Emissionspfad bestimmt; die Obergrenze hingegen wird durch den die kumulierten Emissionen maximierenden Emissionspfad bestimmt. Um die Klimaleitplanke einzuhalten, muss die Transformation des Energiesystems um so früher in Angriff genommen werden, je enger der Korridor wird (wie in Abbildung 5.3). Die Vorverlegung des Last Exit Heaven beträgt bis zu 45 Jahren. Das Verhalten des First Exit (Frühester Zeitpunkt) ist komplizierter. Für das kleine Klimafenster (KF2) können die Emissionen nicht allzu schnell runtergefahren werden, da sonst die \dot{T} -Leitplanke durchbrochen wird (Wegreissen der Aerosolmaske). Grundsätzlich gilt: Je größer das Fenster bei gegebener Klimasensitivität, desto früher ist der First Exit möglich.

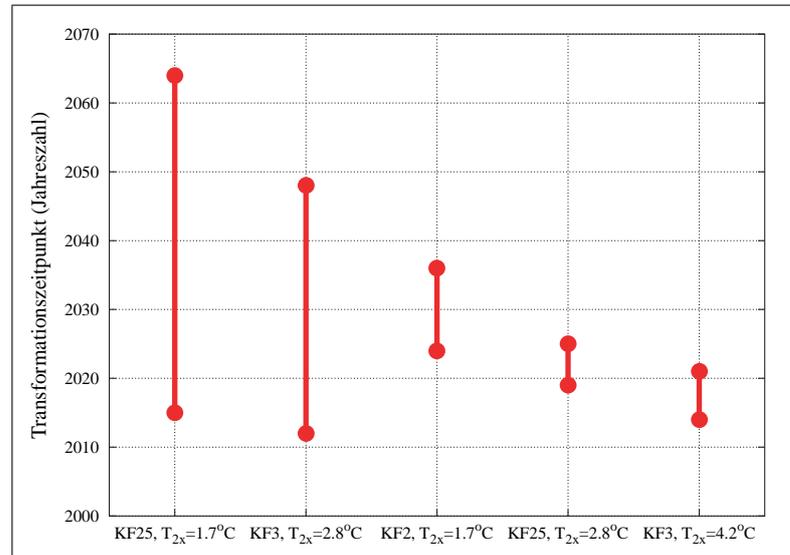


Abbildung 5.4: Zeitlicher Spielraum für eine Transformation des Energiesystems (gemessen am Transformationszeitpunkt) bei verschiedenen Klimafenstern und Annahmen über die Höhe der Klimasensitivität.

5.3 Umbau des Energiesystems unter Emissionsbeschränkungsszenarien

Durch die exogene Vorgabe einer Klimaleitplanke kommt es zur kosteneffektiven Reallokation der Investitionenströme, insbesondere in den erneuerbaren Energiesektor, die zu einer wesentlich früheren Transformation des Energiesystems führen. Wie Abbildung 5.5 zeigt, kann es dadurch zu einer Vorverlegung des *Transformationszeitpunkts*, an dem die Energie aus erneuerbaren Quellen die Menge der fossilen Energie übersteigt, von mehr als 70 Jahren kommen. Gleichzeitig wird ein großer Teil der fossilen Ressourcen im Boden gelassen, worin letztendlich die Klimaschutzwirkung einer frühen Transformation besteht.

Aus der kosteneffektiven Lösung des Wohlfahrtsmaximierungsproblems bei gegebener Klimaleitplanke lässt sich ein kosteneffektiver Emissionspfad als Mengenbeschränkung, und äquivalent ein kosteneffektiver Schattenpreis für die Emission einer Tonne Kohlenstoff als Steuer ermitteln. In einer deterministischen Welt könnte die Politik nun durch Vorgabe dieser Mengengrenze oder Steuer eine kosteneffektive Ein-

haltung des Klimafensters erreichen. Politische Akteure werden aus institutionellen Gründen nicht in der Lage sein, Mengen und Preise optimal zu steuern, sondern werden nach einfachen Faustregeln greifen, um sich der kosteneffektiven Lösung zur Einhaltung des Klimafensters anzunähern. Unmöglich ist eine optimale Steuerung deshalb, weil Akteure mit einem derartigen diskretionären Spielraum dem Einfluss von Interessengruppen ausgesetzt sind; auch könnte eine Behörde, die entweder die Menge oder den Preis der Emissionen diskretionär steuern würde, das Vertrauen der Investoren nachhaltig erschüttern. Darüber hinaus sind natürlich die relevanten Daten zur Bestimmung der Schattenpreise ex-ante nicht bekannt. Wie bereits gezeigt wurde, ist ein wesentlicher Bestimmungsgrund für den Schattenpreis der Emissionen der technische Fortschritt im Sektor der erneuerbaren Energien; gerade deren Lernpotential und deren Lerngeschwindigkeit sind aber nicht bekannt. Diese Unsicherheit kann auch durch das Auswerten historischer Daten bezüglich Lernkurven nicht überwunden werden, weil gerade auf dieser Basis das Potential nicht abgeschätzt werden kann. Niedrige historische Produktivitätsgewinne können ein Indiz dafür sein, dass die Technik ihr Potential schon realisiert hat; sie können aber genauso gut ein Indiz dafür sein, dass die großen Durchbrüche noch zu erwarten sind. Durch die Existenz dieser Unsicherheit und institutionellen Rahmenbedingungen wollen wir prüfen, ob *diskretisierte Emissionsbegrenzungen* ein vernünftiger Weg globaler Umweltpolitik sein können. Vor diesem Hintergrund stellen wir an das Modell MIND die zwei folgenden eng miteinander verknüpften Fragen:

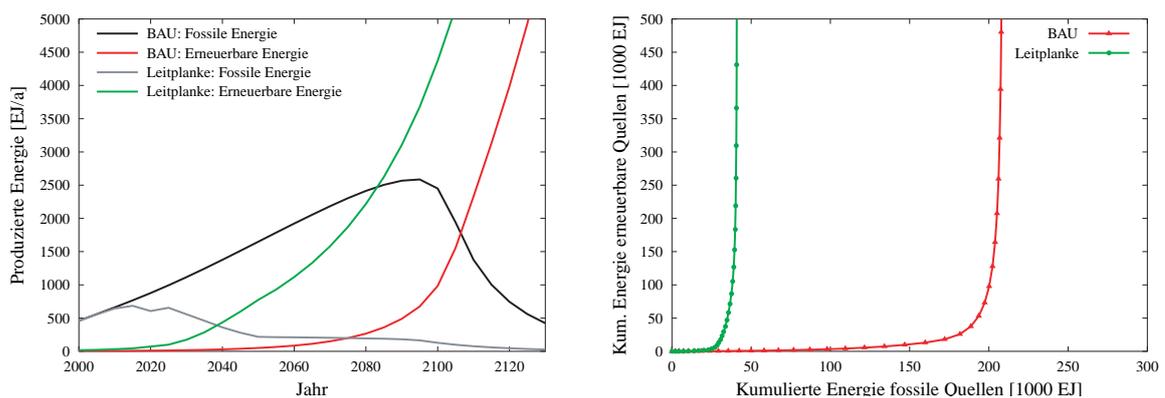


Abbildung 5.5: Vergleich der Energieproduktion des fossilen und erneuerbaren Sektors im „Business-as-Usual“ Fall bei Vorgabe einer Emissionsbeschränkung

- In welcher Form ist eine institutionell diskretisierte Emissionsbegrenzung dazu geeignet, die Einhaltung des Klimafensters zu gewährleisten?
- Wie muss eine institutionell diskretisierte Emissionsbegrenzung aussehen, damit sie zu einer Vorverlegung des Transformationszeitpunktes in der durch die Vorgabe von Klimaleitplanke induzierten Größenordnung führt?

Die bisher im Rahmen des Kyoto-Protokolls ausgehandelten Emissionsbeschränkungen für die Annex I- Länder führen zu einer Verringerung der Emissionen gegenüber dem unbeschränkten „Business As Usual“ (**BAU**) Pfad von höchstens 1% ohne Beteiligung der USA und höchstens 4% mit Beteiligung der USA. Aufgrund dieses geringen Einfluss auf die globalen Emissionen kann das Kyoto-Protokoll allein genommen keine Klimaschutzwirkung entfalten. Dies zeigt sich auch in den Modellrechnungen mit MIND. Ein „Kyoto alleine“-Szenario entfaltet keinerlei Klimaschutzwirkung und kann auch nicht zur Vorverlegung des Transformationszeitpunktes des Energiesystems führen. Dabei spielt das Verhalten der USA in der Kyoto-Phase keine Rolle.

5.3.1 Emissionsbegrenzungsszenarien für die Post-Kyoto-Zeit

Die Frage nach vernünftigen Emissionszielen muss sich also direkt an die nach dem Kyoto-Protokoll anvisierte „2nd Commitment Period“ und noch weit darüber hinaus richten. Unter einer „2nd Commitment Period“ verstehen wir dabei eine sehr lange Zeitspanne von mehreren Jahrzehnten, und nicht einen Zeitraum von fünf Jahren, wie es bei den Verhandlungen der Vertragsstaatenkonferenzen zu erwarten sein wird. Da die Ausgestaltung der Emissionsobergrenzen für die Post-Kyoto-Zeit noch nicht abzuschätzen ist, haben wir acht Szenarien entworfen. Ihre genaue Form und Bezeichnung, mit denen wir sie in diesem Kapitel referenzieren werden, sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Sie unterscheiden sich vor allem durch zwei Charakteristika:

1. Das langfristige Reduktionsziel relativ zum Niveau der Emissionen während der „First Commitment Period“ (Schwach: 20%, Niedrig: 40%, Hoch: 60%, Stark: 80%).
2. Der Zeitraum, für den die Emissionsobergrenze bindend ist (Kurz: 2018-57, Lang: 2018-97).

Szenario	Emissionsobergrenze der Post-Kyoto Commitment Periods Normiert auf Kyoto-Niveau (2008-12) = 1					
	2008-12	2018-27	2028-37	2038-47	2048-2057	2058-97
Schwach + Kurz	1	1	0.8	0.8	0.8	-
Schwach + Lang	1	1	0.8	0.8	0.8	0.8
Niedrig + Kurz	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	-
Niedrig + Lang	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Hoch + Kurz	1	1	0.8	0.6	0.4	-
Hoch + Lang	1	1	0.8	0.6	0.4	0.4
Stark + Kurz	1	0.8	0.6	0.4	0.2	-
Stark + Lang	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.2

Tabelle 5.1: Acht Szenarien für bindende Emissionsbeschränkungen in der Post-Kyoto-Zeit

Zu Untersuchung der Klimaschutzwirksamkeit und volkswirtschaftlichen Verträglichkeit dieser Szenarien haben wir die Emissionsobergrenzen dem Modell MIND vorgegeben. Dabei sind wir wie folgt vorgegangen:

- **Schritt 1:** Zur Bestimmung eines BAU Pfades wird mit MIND eine Wohlfahrtsoptimierung ohne Leitplanke durchgeführt; vergleiche auch Kapitel 4.2.
- **Schritt 2:** Zur Bestimmung des „Kyoto alleine“-Emissionspfades wird mit MIND eine Wohlfahrtsoptimierung unter der Nebenbedingung durchgeführt, dass im Zeitraum 2008-2012 maximal 99% (Kyoto ohne USA) bzw. 96% (Kyoto mit USA) der Emissionen des BAU Pfades erreicht werden dürfen. Im gegebenen Modellrahmen zeigt sich, dass das Verhalten der USA keinen Einfluss auf die Klimaschutzwirksamkeit der Post-Kyoto-Emissionsbeschränkungen hat.
- **Schritt 3:** Auf der Grundlage des „Kyoto alleine“-Emissionspfades können wir nun die genauen Emissionsgrenzen für die Szenarien in Tabelle 5.1 bestimmen. Für jedes Szenario haben wir mit MIND eine erneute Wohlfahrtsoptimierung unter Vorgabe der korrespondierenden Emissionsbegrenzung durchgeführt.

Mit den beschriebenen Verfahren können wir die Klimaschutzwirksamkeit und volkswirtschaftliche Vertretbarkeit der verschiedenen Szenarien für die wichtigsten

Randbedingungen des technologischen Fortschritts auf dem Extraktions- und erneuerbaren Energiesektor untersuchen. Im Rahmen von MIND sind dies die folgenden drei Parameter:

- **Fossile Ressourcenbasis:** Die Verknappung der fossilen Ressourcen führt zu einem Anstieg der Extraktionskosten, während der technologische Fortschritt in Exploration und Extraktion in die entgegengesetzte Richtung wirkt. Bis zur Ausschöpfung der Ressourcenbasis verläuft sie weitgehend flach und steigt danach in der vierten Potenz an. Die Ressourcenbasis wird definiert als die Menge, die in der Zukunft bei gegebenem technischem Fortschritt zu heutigen relativen Preisen abgebaut werden kann. In der Standardeinstellung des Modells benutzen wir eine konservative Schätzung von 3500 GtC. Darüberhinaus betrachten wir noch einen großzügigere Annahme von 5000 GtC.
- **Potential der erneuerbaren Energiequellen:** Das langfristige Potential der erneuerbaren Energien wird durch den maximalen Produktivitätsfaktor κ_{max} auf diesem Sektor bestimmt (vgl. Kap. 4.1). Neben der Standardeinstellung des Modells betrachten wir noch ein hohes Potential, das den Standardwert um zwei Drittel übersteigt.
- **Geschwindigkeit der Lern- und Rationalisierungseffekte im erneuerbaren Energiesektor:** Die Geschwindigkeit, mit der die steigenden Skalenerträge ausgeschöpft werden können, bestimmt sich aus der Zeitkonstante τ in der logistischen Wachstumskurve des Produktivitätsfaktors (vgl. Kap. 4.1). Im Rahmen dieser Analyse verringern wir τ von der Standardmodelleinstellung $\tau = 250$ Jahre auf $\tau = 100$ Jahre, um einen schnell lernenden erneuerbaren Energiesektor zu simulieren.

Die drei technologischen Randbedingungen bestimmen die Durchsetzungsfähigkeit der erneuerbaren Energien gegenüber den fossilen Brennstoffen. Da sie damit auch die Möglichkeit zu einer schnellen Reduktion der CO₂-Emissionen beeinflussen, wird die Klimaschutzwirksamkeit der einzelnen Emissionsbeschränkungen stark von ihnen abhängen. Im Rahmen dieser Analyse betrachten wir sechs Fälle von technologischen Randbedingungen:

1. **Referenzfall:** Standardeinstellung des Modells MIND (**REF**)

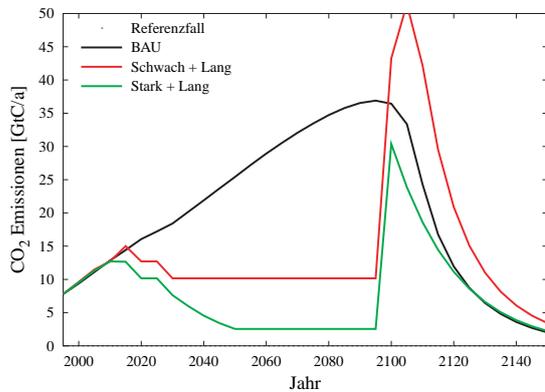
2. **Hohe Ressourcenbasis:** Erweiterte Ressourcenbasis von 5000 GtC, was einen gegenüber dem Referenzfall hohen technologischen Fortschritt auf dem Extraktionssektor impliziert. (**EXT**)
3. **Hohes Potential:** Gegenüber dem Referenzfall erhöhtes Potential für die Produktivität des erneuerbaren Energiesektors. (**POT**)
4. **Schnelles Lernen:** Im Vergleich zum Referenzfall schnellere Lern- und Rationalisierungseffekte im erneuerbaren Energiesektor. (**LERN**)
5. **Hohe Basis + Lernen:** Hoher technologischer Fortschritt auf dem Extraktionssektor und gleichzeitig auch schnellere Lerneffekte im erneuerbaren Energiesektor. Dieser Fall modelliert einen Widerstreit des technologischen Fortschritts in den beiden konkurrierenden Sektoren. (**LERN + EXT**)
6. **Hohes Potential + Lernen:** Erneuerbarer Energiesektor, der sowohl schnelle Lerneffekte erzielen als auch ein hohes Produktivitätspotential realisieren kann. (**LERN + POT**)

5.3.2 Diskussion der Ergebnisse

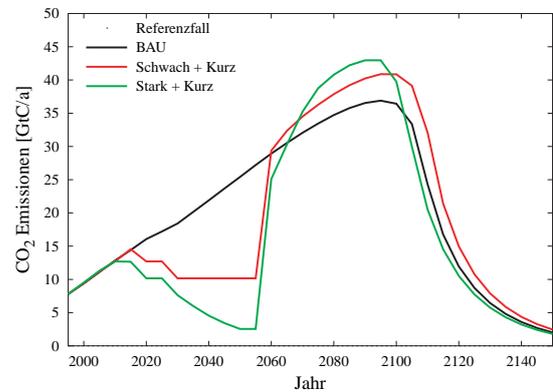
Das Ergebnis lässt sich recht einfach zusammenfassen: Je höher das Lernpotential der erneuerbaren Energien ist und je schneller es realisiert werden kann, desto eher kommt es zu einer nachhaltigen Emissionsreduktion.

Dabei ist nicht so sehr die Stärke der Emissionsreduktionen entscheidend, sondern ihre Dauer (siehe Abbildung 5.6). Sind die Emissionsbeschränkungen nur kurz wirksam, kehrt die Wirtschaft wieder schnell auf ihre fossilen Pfad zurück. Dabei kann es sogar zu überschüssenden Reaktionen kommen, wenn die Reduktionsverpflichtung ehrgeizig ist, jedoch nur für eine relativ kurze Zeitspanne verpflichtend ist.

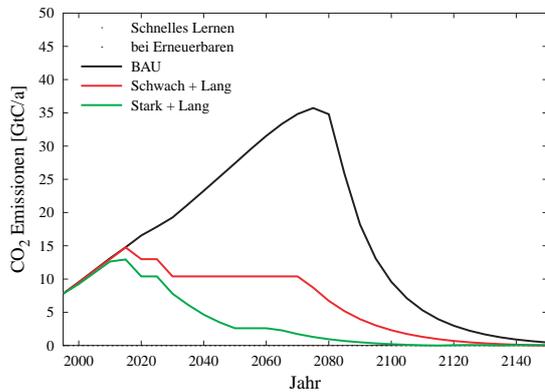
Die Abbildung 5.7 zeigt, dass das Klimafenster umso leichter erreicht wird, je höher das Lernpotential und die Lerngeschwindigkeit ist; von der Höhe des Lernpotentials ist auch abhängig, ob ein anspruchsvolleres Klimafenster erreicht werden kann. Die Anomalien der Pfade, die im Klimafenster auftreten (siehe Abbildung 5.7), sind auf die Aerosoldynamik zurückzuführen; der sofort einsetzende Kühlungseffekt vermindert die Globale Mitteltemperatur sofort; dadurch kommt es nach Auslaufen



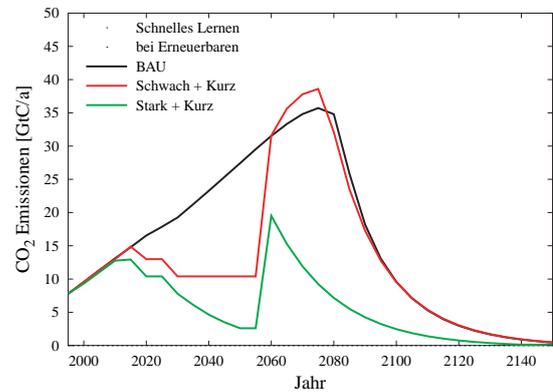
a. Lange Verpflichtung, Referenzfall



b. Kurze Verpflichtung, Referenzfall



c. Lange Verpflichtung, schnelles Lernen

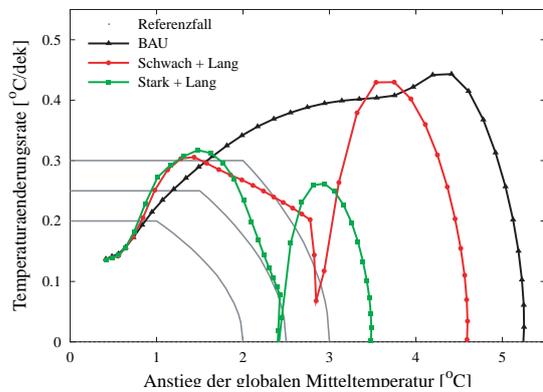


d. Kurze Verpflichtung, schnelles Lernen

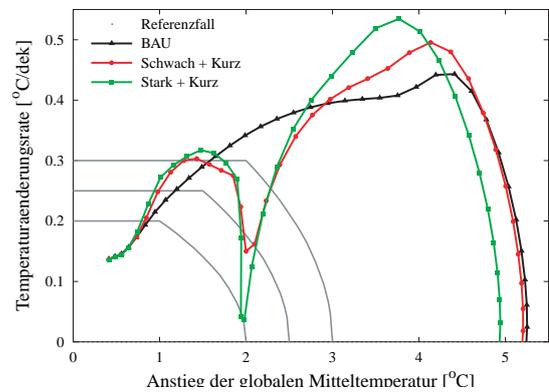
Abbildung 5.6: Verlauf der Emissionen bei unterschiedlicher Lerngeschwindigkeit und unterschiedlicher Dauer der Reduktionsverpflichtung

der Emissionsbeschränkung zu einem enormen Emissionsanstieg. Das hier verwendete Klimamodell ist nur eine lineare Näherung an elaboriertere Modelle; daher stößt es an seine Grenzen, wenn der Anstieg der Emissionen und Konzentration zu stark ist.

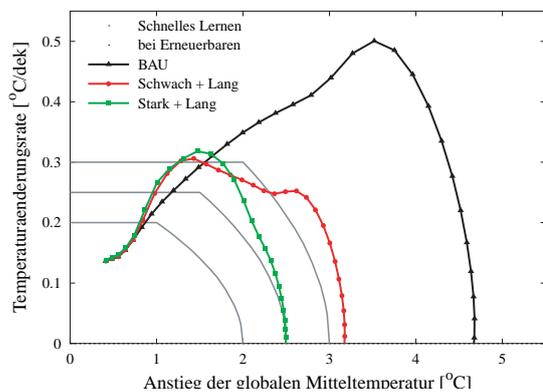
Die Geschwindigkeit, mit der das Energiesystem von einem fossilen zu einem erneuerbaren umgebaut wird, zeigt Abbildung 5.8. Die Abbildungen verdeutlichen eindrucksvoll, wie sehr der Umbau zu einem durch starke und dauerhafte Verpflichtungen zur Emissionsreduzierung beschleunigt wird; eine schnelle Realisierung des Lernpotentials im erneuerbaren Sektor beschleunigt den Umbau zusätzlich. Die Entwertung der Renteneinkommen im fossilen Sektor schreitet so stark voran, dass die



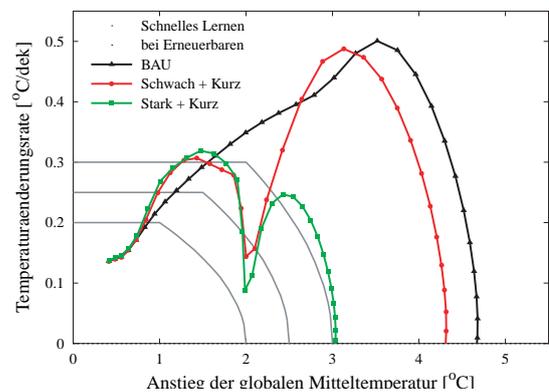
a. Lange Verpflichtung, Referenzfall



b. Kurze Verpflichtung, Referenzfall



c. Lange Verpflichtung, schnelles Lernen

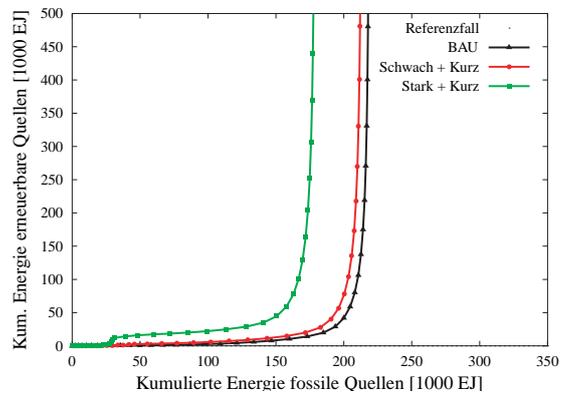
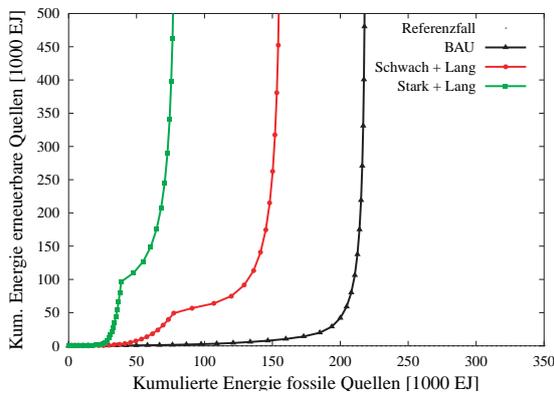


d. Kurze Verpflichtung, schnelles Lernen

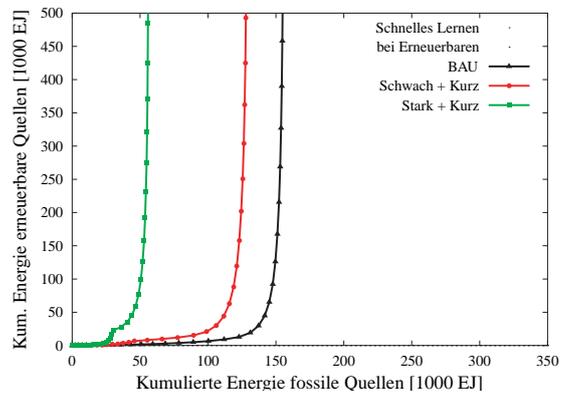
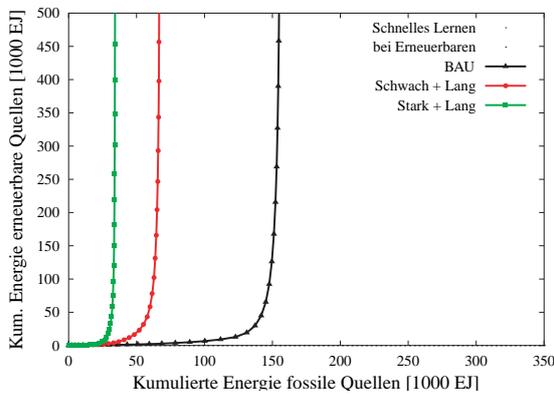
Abbildung 5.7: Erreichtes Klimafenster bei unterschiedlicher Lerngeschwindigkeit und unterschiedlicher Dauer der Reduktionsverpflichtung

kumulierte Energie des fossilen Sektors nahezu konstant bleibt.

In Abbildung 5.9 zeigt sich der Einfluß einer veränderten Ressourcenbasis; im BAU-Szenario verzögert eine erhöhte Ressourcenbasis den Umbau des Energiesystems, weil die Opportunitätskosten der fossilen Ressourcen gegenüber den erneuerbaren Energien drastisch sinken. Eine erhöhte Lerngeschwindigkeit wirkt diesem Effekt entgegen. Muss die Wirtschaft eine Leitplanke erfüllen, so bleiben die beiden Effekte grundsätzlich erhalten; das schnelle Lernen wird aber in seiner Wirkung besonders verstärkt; die Umbaugeschwindigkeit des Energiesystems nimmt zu. Dieser Zusammenhang zeigt sich auch im Vergleich des technischen Fortschritts in beiden Sektoren; in Bild c zeigt der Vergleich der Produktivitäten, wann der erneuerbare



a. Einfluss Ressourcenbasis + Lernen, BAU-Szenario b. Einfluss Ressourcenbasis + Lernen, Verpflichtungen

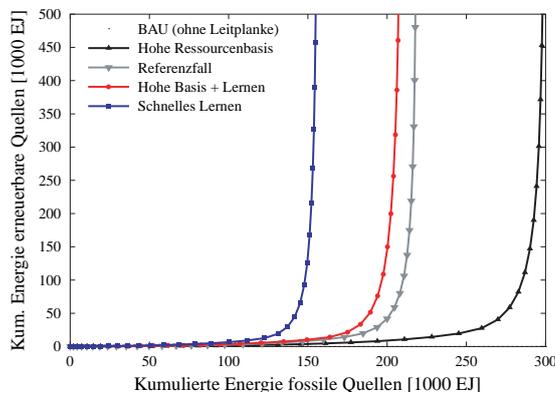


c. Opportunitätskosten im BAU-Szenario d. Opportunitätskosten bei Verpflichtungen

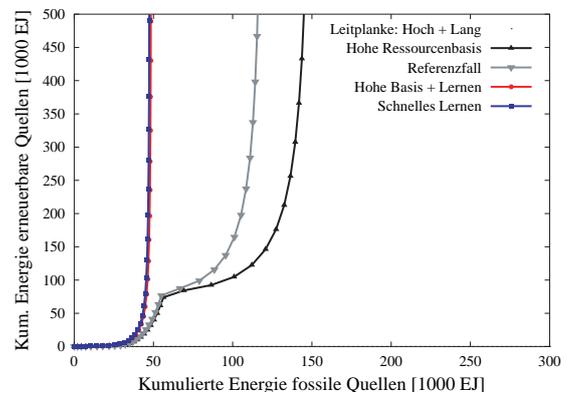
Abbildung 5.8: Transformationspfade zum Umbau des Energiesystems

Energiesektor den fossilen Energiesektor in seinen Produktivitätsfortschritten über-
 rundet. Obwohl der fossile Sektor ebenfalls Lernkurveneffekte aufweist, schlägt die
 Verknappung der fossilen Ressourcen immer stärker zu Buche. Erwartungsgemäß
 zeigt sich, dass die erneuerbaren Energien bei einer Emissionsbeschränkung schnel-
 ler wettbewerbsfähig werden.

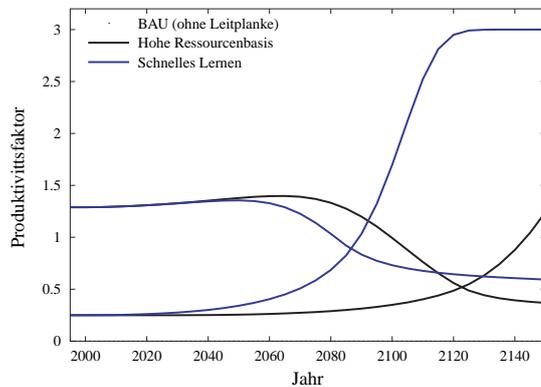
Wir haben uns bisher nur mit dem Einfluss der Ressourcenbasis und des Ler-
 nens auf die Umbaugeschwindigkeit des Energiesystems beschäftigt; entscheidend
 für die Erfolgsaussichten des Klimaschutzes sind natürlich die Konsumverluste (oder
 Wohlfahrtsverluste) einer Emissionsbeschränkung. Wie Abbildung 5.10 zeigt, redu-
 zieren sich die Konsumverluste gegenüber dem Referenzfall umso mehr, je höher das
 Lernpotential und je höher die Lerngeschwindigkeit ist. Die Erhöhung der Ressour-



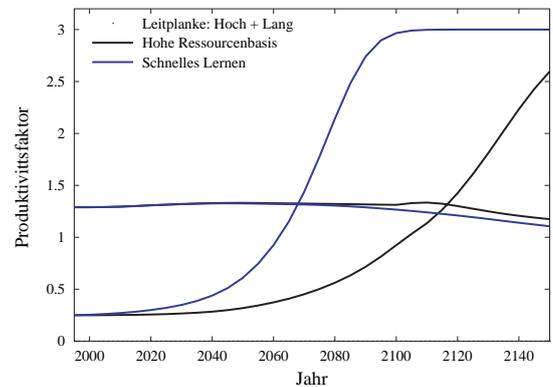
a. Umbaupfad im BAU Szenario



b. Umbaupfad mit Leitplanke



c. Fortschr. foss./erneuerbare, BAU-Szenario



d. Fortschr. foss./erneuerbare, Verpflichtungen

Abbildung 5.9: Einfluss der Ressourcenbasis und des Lernens auf den Umbau des Energiesystems für das BAU-Szenario und für eine lange und hohe Reduktionsverpflichtung

cenbasis (durch technischen Fortschritt in der Extraktion) wirkt in die umgekehrte Richtung: Sie erhöht die Konsumverluste. Dies überrascht nicht, denn je reichlicher und billiger fossile Ressourcen vorhanden sind, umso teurer wird es, sie wegen des Emissionszieles nicht nutzen zu dürfen.

Ein guter Indikator, um den Zeitpunkt der Energiesystemtransformation anzuzeigen, ist der Zeitpunkt, an dem der Anteil der erneuerbaren Energien an der Gesamtenergie 50% beträgt. In Abbildung 5.11 wird mit diesem Indikator für die unterschiedlichen Szenarien deutlich, dass sowohl starke und kurze Emissionsverpflichtun-

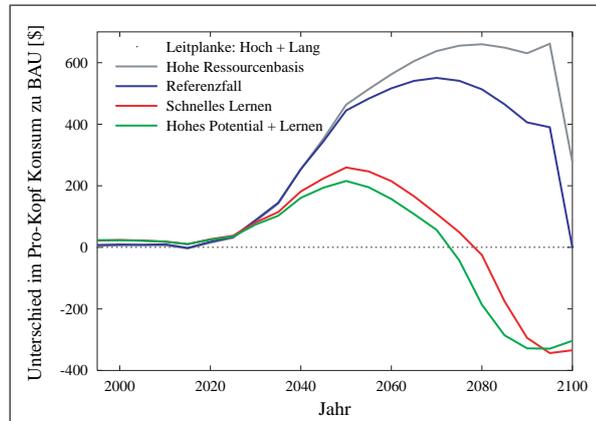


Abbildung 5.10: Konsumverluste bei einer hohen Emissionsverpflichtung

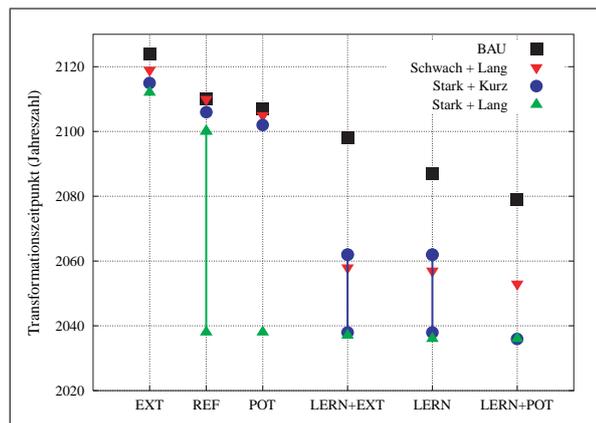


Abbildung 5.11: Transformationszeitpunkte bei unterschiedlichen Szenarien

gen, als auch schwache und kurze Emissionsverpflichtungen nicht zum Ziel führen. Allerdings ist eine starke und langandauernde Reduktionsverpflichtung nur eine notwendige Bedingung dafür, dass das mittlere Temperaturfenster auch tatsächlich erreicht wird. Die Linien in Abbildung 5.11 weisen auf jene Szenarien hin, in denen der Übergang von einer kurzen Verpflichtungsperiode zu einer langen auch tatsächlich zum Erreichen des mittleren Temperaturfensters führt. Weniger die Höhe der Reduktionsverpflichtung ist entscheidend, als ihre Dauer.

5.4 Leitplanken zur Impulsgebung und Erwartungsstabilisierung

In diesem Abschnitt erklären wir die ökonomische Bedeutung der Erwartungsstabilisierung (5.4.1) und diskutieren einen Vorschlag zur aktuellen Umweltpolitik (5.4.2); wir legen damit die Grundlage für die ordnungspolitische Diskussion in Teil 6.

5.4.1 Stabilisierung der Erwartung und steigende Skalenerträge

Bisher haben wir nur erläutert, dass Emissionsverpflichtungen zum Ziel führen können. Begründet haben wir diese Aussage aber noch nicht. Das erstaunliche an dem Modell ist, dass die Reduktionsverpflichtungen bereits wirken, wenn sie nur angekündigt werden. Ein rationaler Investor wird bereits auf diese Ankündigung - sofern sie glaubhaft ist - reagieren. Er wird sofort damit beginnen, vermehrt in den erneuerbaren Sektor zu investieren. Abbildung 5.12 zeigt, dass die Investitionen in den erneuerbaren Energiesektor bereits durch die Ankündigung künftiger Reduktionsverpflichtungen steigen. Wie bereits ausführlich erläutert, steigt dadurch die Produktivität der Energieproduktion im erneuerbaren Sektor, damit werden aber auch die steigenden Skalenerträge schneller realisiert. Da aber die Investoren auch bei der Erhöhung der Produktivität die Mühen der Ebene überwinden müssen, führt eine kurze Zeitspanne der Reduktionsverpflichtung dazu, dass sie schließlich ihre Investitionen zurückfahren und wieder auf die fossilen Energieträger umsteigen. Sind die Reduktionsverpflichtungen allerdings lange verbindlich, dann werden die Lerneffekte auch tatsächlich realisiert und die Zielvorgabe wird sogar übertroffen, ohne dass es zu großen Konsumverlusten kommt. Durch die Ankündigung der Reduktionsverpflichtung werden die Investoren auf einen Pfad gelockt; ist dieser einmal beschritten, werden sie ihn nicht mehr verlassen, da es für sie ökonomisch vorteilhafter ist, auf diesem Pfad zu bleiben als auf die erneute Nutzung fossiler Energie zu setzen. Stablen Erwartungen im Zusammenspiel mit steigenden Skalenerträgen führen zu einem faszinierenden Ergebnis: Die Investoren können aufgrund eines stabilen Rahmens Möglichkeiten realisieren, die sie ansonsten nicht realisieren würden. Zur Internalisierung sozialer Kosten wurde die Stabilisierung von Investitionserwartungen bisher noch wenig diskutiert. Der Effekt stabiler Erwartungen auf die tatsächliche

Emissionsreduktion ist um so geringer, je geringer die Lerneffekte sind.

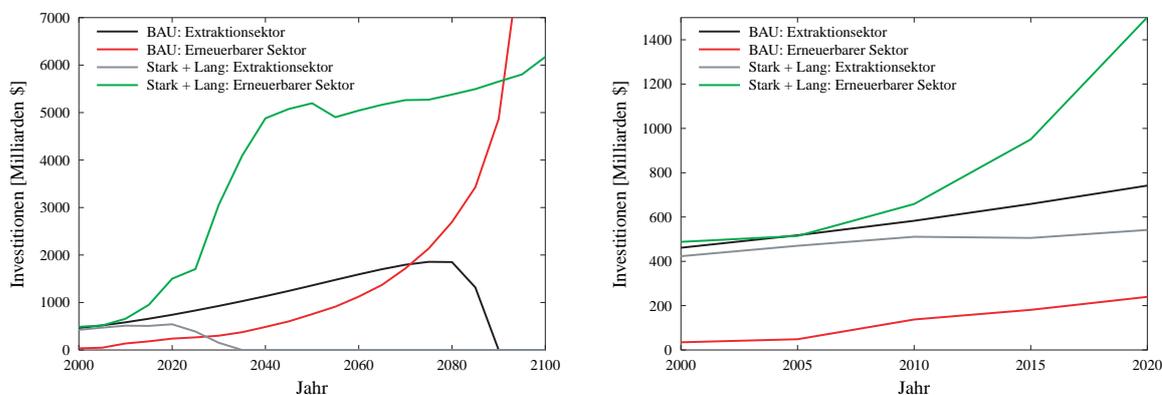


Abbildung 5.12: Investitionsströme in den erneuerbaren und fossilen Extraktionssektor ohne (BAU) und mit einer starken und langen Emissionsobergrenze (Stark + Lang). Im rechten Bild ist das Investitionsverhalten in den nächsten zwei Dekaden im Detail betrachtet.

Können Investoren sicher erwarten, dass sie mit einer Emissionsreduktion konfrontiert werden, so ist es möglich, dass sie ihre Investitionsentscheidungen verändern; dies geschieht um so eher, je ausgeprägter die steigenden Skalenerträge sind und je länger die Verpflichtungen gelten. Sind die Investoren nur mit Kyoto von 2008-2012 konfrontiert, wird es keinerlei Reaktion geben. Das Ziel ist nicht anspruchsvoll genug.

Dieses Modell der Erwartungsstabilisierung hat jedoch nur dann einen Sinn, wenn man davon ausgeht, dass es in der realen Welt Unsicherheit gibt und dass es Institutionen gibt, die diese Unsicherheit reduzieren können. Das Modell im Abschnitt 4 kennt keine Unsicherheit. Sowohl der Investor als auch die politische Behörde, die das Klimafenster formuliert, kennen sowohl den Schattenpreis der Emissionen als auch den Zeitpfad der Emissionen. Beide verwenden das Modell MIND; sie sind daher über einen sich zeitlich verändernden Zertifikatspreis oder eine CO₂-Steuer nicht beunruhigt; weder Preis- noch Mengenpfad führen zu sich verändernden Investitionsentscheidungen.

Gehen die Investoren jedoch davon aus, dass die Behörden nicht über das richtige Modell verfügen (also MIND noch nicht kennen), müssen sie damit rechnen, dass der diskretionäre Spielraum dazu führt, dass die Behörde eine sub-optimale Politik betreiben wird. Möglicherweise werden ihre Investitionsentscheidungen am gerade

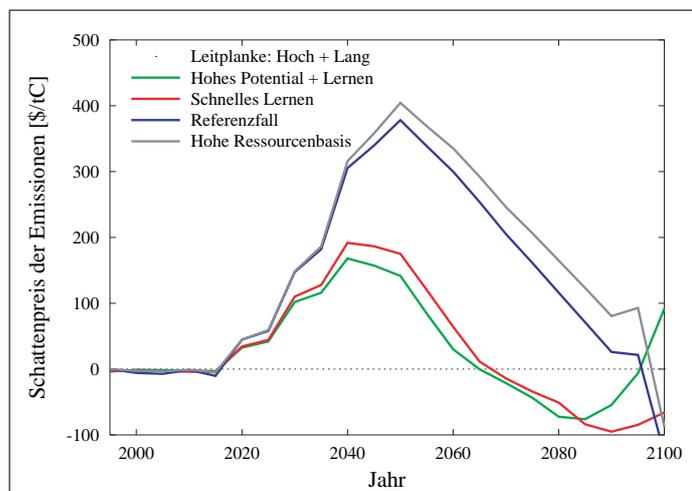


Abbildung 5.13: Schattenpreis der Emissionen bei einem hohen und langen Reduktionsziel relativ zum Fall ohne Leitplanke. Der Schattenpreis ist für verschiedene Randbedingungen des technologischen Fortschritts auf dem erneuerbaren Sektor und dem Extraktionssektor gezeigt

herrschenden Zertifikatspreis ausrichten, was wiederum zu einem sub-optimalen Investitionsverhalten führt. Um dies zu vermeiden, kann die Politik einen langfristig stabilen Ordnungsrahmen vorgeben. In der Tat lässt sich Klimaschutz damit erfolgreich betreiben.

5.4.2 Das Sicherheitsventil

Die Unsicherheit über die ökonomischen Kosten und über den eintretenden Klimawandel hat zum Vorschlag eines Sicherheitsventils geführt, das vom MIT [Jacoby and Ellerman, 2002] und vom Resources for the Future [Morgenstern, 2002] vorgelegt wurde. Beide Vorschläge laufen darauf hinaus, dass die staatlichen Behörden nicht nur eine Mengenbeschränkung vorgeben, implementiert über ein Zertifikatssystem, sondern auch einen Zertifikatspreis, der nicht überschritten werden darf; würde er überschritten werden, so wäre die Behörde verpflichtet, die Mengenbeschränkung zu lockern. Dieses Sicherheitsventil soll die Wirtschaft davor bewahren, mit zu hohen Kosten der Vermeidung konfrontiert zu werden.

Diesen Kompromissvorschlag, so die Hoffnung, könnten beide Seiten, sowohl Ökonomen als auch Umweltschützer, akzeptieren. Sollte die Wirtschaft tatsächlich

so innovativ sein wie manche Umweltschützer und Klimaforscher glauben, würden die Zertifikatspreise eine bestimmte Höhe nicht überschreiten; das Reduktionsziel müsste dann auch nicht verändert werden. Ist die Wirtschaft allerdings nicht so innovativ, dann liefe ein solches Verfahren darauf hinaus, das klimapolitische Ziel zu lockern, um der Wirtschaft einen hohen Zertifikatspreis zu ersparen.

Die hier vorgestellten Szenarien zeigen, dass der Zertifikatspreis (hier der Netto-Schattenpreis der Emissionen) im wesentlichen von den steigenden Skalenerträgen im Sektor der erneuerbaren Energien abhängt. Obige Abbildung zeigt, dass hier ein Zertifikatspreis von 200 Dollar pro tC erreicht würde. Freilich hat der Vorschlag einen nicht unbeträchtlichen Schönheitsfehler: Die Kombination von Preis- und Mengensteuerung lädt die Behörden zur interventionistischen Willkür ein, die dann genau das Gegenteil von dem bewirkt, was sie bewirken soll: die Stabilisierung von Erwartungen. Diese Willkür könnte vermieden werden, wenn sich die Behörde verpflichtet nur dann das Reduktionsziel zu lockern, wenn der Zertifikatspreis über fünf Jahre hinweg mehr als 200 Dollar pro tC beträgt. Die Modellrechnungen zeigen ja, dass auf mittlere Sicht der Zertifikatspreis sinken wird.

Vor dem Hintergrund der in diesem Kapitel geführten Diskussion müsste sowohl die Obergrenze der Emissionen für einen relativ langen Zeitraum gelten als auch der Zertifikatspreis, um ein „stop and go“ zu vermeiden. Mit dieser Diskussion sind die Grenzen unserer Szenarienrechnungen erreicht. Es würde sich durchaus lohnen, hier etwa verschiedene Formen der CO₂-Steuer mit denen von Emissionsbeschränkungen zu vergleichen. Eine realistische Einschätzung der Vorschläge ließe sich jedoch nur in einem Modell erreichen, in dem das Verhalten der Politik realistisch beschrieben wird. Die neue Politische Ökonomie ist in den letzten beiden Jahrzehnten zu einer recht negativen Einschätzung der Wirkung der Politik auf die Gesellschaft gelangt. Vielleicht ist es daher an der Zeit, über eine positivere Rolle der Wirtschafts- und Umweltpolitik nachzudenken, die vor allem darin besteht, Erwartungen zu stabilisieren.

Kapitel 6

Grundzüge einer neuen Energie- und Umweltpolitik

In diesem Abschnitt werden wir das Konzept der Resilienz diskutieren, das es erlaubt, die Vielfalt der Szenarien zu verdichten. In einem zweiten Teil skizzieren wir die ordnungspolitischen Implikationen globaler Umweltprobleme.

6.1 Die Idee der Resilienz in Natur- und Gesellschaftsbildern

Die Zukunft des Energiesystems lässt sich zu vier grundlegenden Szenarien verdichten, die in Abbildung 6.1 entlang der fundamentalen Dimension der „Resilience“ aufgespannt sind. Unter Resilience des Wirtschaftssystems wird hier, wie bereits angedeutet, dessen Fähigkeit zur Innovation verstanden. Die Resilience des „natürlichen“ Systems bezieht sich auf dessen Fähigkeit, ein homöostatisches Gleichgewicht trotz (anthropogener) Störung zu erhalten. Damit können vier Grundszenarien bestimmt werden:

Das Szenario „Grüne Apokalypse oder Ökonomisches Disaster“ stellt jene Region dar, in der nur „tragische“ Entscheidungen getroffen werden können. Diese tragische Entscheidungssituation setzt jedoch eine Welt voraus, in der sowohl das soziale als auch das natürliche System nur eine geringe Resilience aufweisen. Man kann vielleicht überspitzt sagen, dass dieses Szenario in den „Grenzen des Wachstums“ modelliert wurde und die Vorstellungswelt der Umweltbewegung der 70er

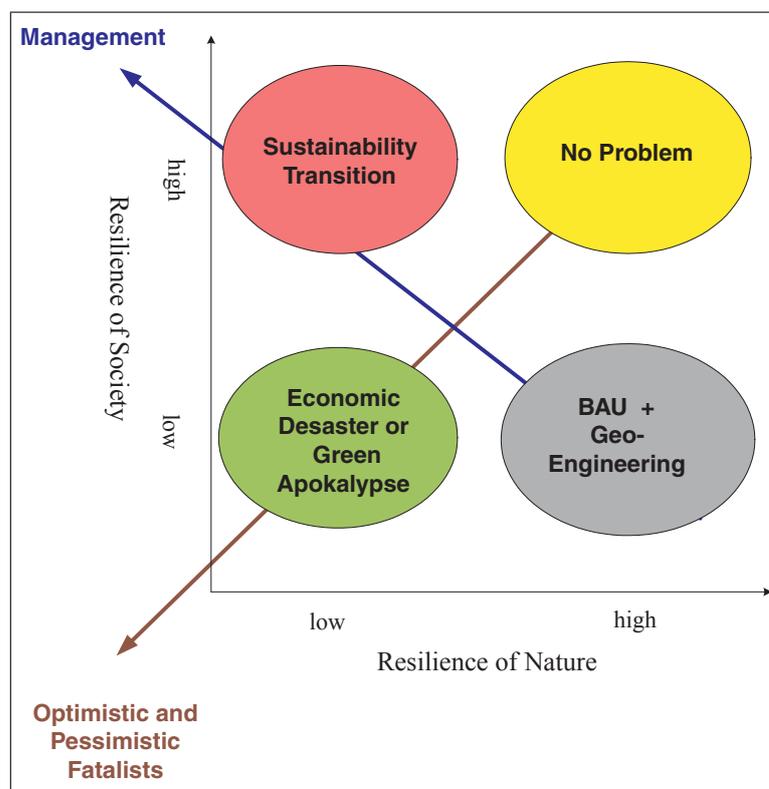


Abbildung 6.1: Fatalisten und Manager

Jahre widerspiegelt. Dieses Szenario spiegelt jene Welt wider, in der weder die Energieeffizienz erhöht, noch fossile Energie durch erneuerbare Energien substituiert werden kann.

Viele Renegaten der Umweltbewegung scheinen sich zunehmend in die „No Problem“ Richtung zu bewegen. Die schier ungebrochene Leistungsfähigkeit des Kapitalismus und das Ausbleiben der Apokalypse hat den Glauben erschüttert, die Menschheit steuere auf einen Eisberg zu: Wirtschaft und Natur haben sich als relativ elastisch erwiesen. Man werde die Umweltprobleme - so sie denn überhaupt existieren - schon meistern. Das ist im wesentlichen die Botschaft von Julian Simon, oder jüngst Björn Lomborg. Dieses Szenario ließe sich am besten durch ein ökonomisches BAU-Szenario beschreiben, bei gleichzeitig nahezu unbegrenzter Resilienz des Natursystems.

In Abbildung 6.1 haben wir diese beiden Gruppen als Fatalisten bezeichnet, die einen optimistisch, die anderen pessimistisch. Beide gehen davon aus, dass es zur

Lösung der weltweiten Umweltprobleme keiner gesonderten Anstrengungen bedarf, sondern dass fatalistisch zu akzeptieren ist, was ohnehin geschieht. Nur gehen die einen davon aus, dass der „Untergang“ - ökonomisch oder ökologisch - unvermeidbar ist, während sich für die anderen das Paradies unausweichlich und von alleine realisieren wird. Unserer Auffassung nach lohnt es sich nicht, diese Debatte weiter zu vertiefen. Beide Weltbilder verhindern die Diskussion konkreter Lösungsmöglichkeiten und sind eher geeignet, sich in kryptotheologischen Debatten zu verlieren. Die beiden anderen Szenarien verdienen hingegen eingehendere Aufmerksamkeit.

Das Szenario BAU+Geo-Engineering geht davon aus, dass Gesellschaft und Wirtschaft in den nächsten hundert Jahren keine gravierenden Umbau-Maßnahmen zugemutet werden können, vor allem darum, weil die erneuerbaren Energieträger in der geforderten Frist keine ausreichende Durchschlagkraft entfalten können. Dahinter steht die unausgesprochene Annahme, die Institutionen des Kapitalismus seien eng mit der Nutzung fossiler Energie verbunden. Verändere man die Energiebasis, dann müsse man auch die institutionelle Matrix der Gesellschaft weitreichend verändern. Der Zusammenhang zwischen fossiler Energiebasis und der institutionellen Matrix des Kapitalismus ist noch wenig erforscht. Hier sei nur festgestellt, dass Verfechter des Geo-engineering offensichtlich voraussetzen, die Zeitfristen für diese sozialen Lernprozesse könnten sich als zu langsam herausstellen, um das Klimasystem noch rechtzeitig zu stabilisieren. Darum sei es vernünftig, auf eine planetarische end-of-pipe Technik zurückzugreifen, die es ermögliche, das Klimasystem zu stabilisieren, ohne Gesellschaft und Wirtschaft allzu große Anpassungsleistungen zuzumuten. Es versteht sich von selbst, dass sich diese Option nur dann vertreten lässt, wenn man nicht nur zeigen kann, dass entweder die geologischen Formationen oder der Ozean die größere Deponie für die Treibhausgase ist, sondern auch „elastischer“ als die Atmosphäre. Ist diese Voraussetzung gegeben, wäre die Option verantwortbar (Szenario 5).

Der Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem setzt eine höhere „Resilience“ des Wirtschaftssystems voraus; außerdem geht diese Option davon aus, dass die ökologischen Risiken sowohl der fossilen Energienutzung als auch des Geo-Engineering beträchtlich sind. Es lohnt sich in diesem Zusammenhang zu fragen, was denn eine relativ hohe „Resilience“ des Wirtschaftssystems im Lichte des hier vorgestellten Modells nun genau bedeutet, und was damit nicht gemeint ist: Wir haben unserer Modellwelt keine Verzicht auf Konsumzuwächse zugemutet. Soziale Kon-

flikte sind in kapitalistischen Gesellschaften meist Verteilungskonflikte, die sich bei positiven Wachstumsraten leichter lösen lassen. Es gibt gute Anhaltspunkte dafür, dass der Verteilungskonflikt zwischen „Kapital“ und „Arbeit“ eine der wesentlichen Antriebskräfte ist für die historisch hohen Wachstumsraten der Arbeitsproduktivität (Edenhofer et.al. 1998). Es gibt wenig Anzeichen dafür, dass sich im globalen Maßstab der Konflikt so weit entschärfen könnte, dass er ohne Wirtschaftswachstum handhabbar wäre. Die Lösung sozialer Konflikte durch Wirtschaftswachstum könnte noch lange beibehalten werden, wenn es auch viele Gründe geben mag, die Wachstumsgesellschaft zu überwinden. Es mag aus anderen Gründen wünschenswert sein, dies zu ändern (Szenario 2 und 3).

Wir haben in den Szenarienrechnungen gezeigt, dass der Umbau des Energiesystems möglich ist, ohne den Verteilungskonflikt weiter anzuhetzen. Weder ist ein dauerhaft hoher Energiepreis noch ein höherer Anteil an der Faktorentlohnung wäre nötig, um den Umbau des Energiesystems zu bewerkstelligen. Was allerdings dringend nötig ist, ist eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz und eine aggressive Substitutionsstrategie, die den erneuerbaren Energien einen Entwicklungskorridor eröffnet. Dies ist realistisch, wenn sich die großen Durchbrüche bei der Kostensenkung erst noch einstellen und für die nächsten hundert Jahre keine neue unüberwindlichen Knappheiten, etwa beim Boden entstehen. Ökonomisch vernünftig ist dies jedoch nur dann, wenn neu entstehende Knappheiten den Märkten durch geeignete institutionelle Arrangements signalisiert werden. Wir haben die Möglichkeit eines Zertifikatssystems vorgestellt, das institutionell durchaus realistisch ist: Eine moderate Emissionsreduktion, die aber glaubhaft für einen langen Geltungszeitraum angekündigt wird, ist institutionell wahrscheinlich vernünftiger als eine Behörde mit der Möglichkeit einer diskretionären Mengen- und Preissteuerung auszustatten.

Der Umbau des Energiesystems wird selber wiederum nicht ohne soziale Konflikte vonstatten gehen: Bei Einführung einer Emissionsbeschränkung, etwa durch ein System handelbarer Emissionszertifikate, ist es für die Besitzer fossiler Ressourcen nicht mehr möglich, durch technischen Fortschritt ihre Renten zu steigern. Im Gegenteil: der technische Fortschritt bei den erneuerbaren Energien lässt ihre Renten zusätzlich erodieren. Vor diesem Hintergrund ist es durchaus verständlich, dass die Besitzer fossiler Ressourcen entweder die Bedeutung des Klimawandels bestreiten wollen, oder - sofern sie mit dieser Strategie nicht erfolgreich sind - auf die Option des Geo-Engineering ausweichen. Im Modell MIND zeigt sich deutlich, dass es optimal

wäre, wenn sich die erneuerbaren Energien durchsetzen und keine weiteren Investitionen im Bereich der Extraktion getätigt würden. MIND zeigt hier aber lediglich die erwünschte Lösung des sozialen Konfliktes. Auf realen Märkten hängen Investitionsentscheidungen wesentlich von den Erwartungen der Marktteilnehmer ab. Stabilisieren sich die Erwartungen der Investoren um das BAU+Geo-Engineering Szenario, so wird die Realisierung eines Nachhaltigkeitsszenarios immer unwahrscheinlicher. Es wird daher darauf ankommen, dass ein Umbau-Szenario des Energiesystems für die Investoren überhaupt greifbar wird. Im Augenblick scheint sich unter den institutionellen Investoren der Konsens herauszubilden, dass ein Nachhaltigkeitsszenario wenig Chancen hat.

6.2 Stabilisierung von Erwartungen und steigende Skalenerträge

Stabile Investitionserwartungen haben einen wohlfahrtserhöhenden Effekt. Diese Einsicht kann sich auf einen überwältigenden Konsens in der Wirtschaftswissenschaften stützen. In diesen Modellen geht es vor allem darum, stochastische Störungen zu vermeiden, also im wesentlichen die Volatilität von Preis- und Mengenbewegungen zu reduzieren. Darauf zielt das hier vorgeschlagene Modell nicht primär ab: In MIND geht es darum, windows of opportunity zu nutzen, um gezielt lock-in-Effekte zu erzeugen.

Die Verantwortung für die Stabilisierung von Investitionserwartungen hat nicht nur der Staat; eine Vielzahl von Akteuren kann dabei eine Rolle spielen. Die Frage ist, welche Erwartungen sich stabilisieren *werden* und welche stabilisiert werden *sollen*. Angesichts von Pfadabhängigkeit der Investitionen und steigenden Skalenerträgen hat diese Frage ein besonderes Gewicht, da Pfadabhängigkeiten durchaus Effizienzgewinne ermöglichen, andererseits aber auch die Flexibilität vermindern.

Stabile Erwartungen ermöglichen aber auch soziales Lernen; an diesem Prozess können sich nicht nur Märkte beteiligen, sondern auch die Öffentlichkeit, die Zivilgesellschaft. Die Rolle der Haushalte als Sparer und Investoren wird hier besonders wichtig.

Haushalte haben eine große Bedeutung als Investoren. Es kommt darauf an, dass sie am Kapitalmarkt ihre Präferenzen zum Ausdruck bringen können. Dabei ist die

klare Definition von Eigentumsrechten nur eine Bedingung. Die andere ist, dass Investitionen selbst ein Koordinationsproblem darstellen. Institutionelle Investoren sind hier durchaus in der Lage dieses Problem zu lösen und die externen Effekte sowohl von Lernkurven als auch von Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen zu internalisieren.

Die Stabilisierung von Investitionserwartungen hat vor allem den Sinn, den Planungshorizont der Entscheidungen zu verlängern, weil sich ansonsten bestimmte Lernkurven gar nicht realisieren ließen. So würden bei kurzem Planungshorizont vor allem die „konservativen“ Lernkurven realisiert.

6.3 Marktwirtschaft und Ordnungspolitik

In diesem Bericht haben wir einen synthetischen Blick auf die Zukunft des Energiesystems geworfen. Die Frage nach dem optimalen Design eines Energiesystems und seiner Steuerung mag Widerspruch hervorrufen. Seit der Industrialisierung hat das Energiesystem eine lange Evolution hinter sich: Das Energiesystem ist zwar durch menschliches Handeln entstanden, ob dahinter ein rationales Konzept stand, ist fraglich. Ökonomen in der Tradition von Hayek würden die Geschichte des Energiesystems eher als unbeabsichtigte Wirkung menschlicher Anpassung interpretieren, und weniger als Verwirklichung eines umfassenden Masterplans. Allein der Versuch, ein optimales Energiesystem zu entwerfen, setzt sich dem Vorwurf aus, sich Wissen anzumaßen, das kein Mensch besitzen könne, weil eben der Markt als Ganzes über Kenntnisse verfügt, über die kein einzelner Entscheidungsträger verfügt.

Dieser Einwand Hayeks gegen politische Planung hat nach dem Zusammenbruch der Planwirtschaften seine Berechtigung; auch werfen seine Einwände eine Fülle von Fragen auf, die hier nicht beantwortet sollen. Aber es gab und gibt immer wieder wirtschaftspolitische Fragestellungen, die mit dem Hinweis, graduelle Evolution sei besser als Planung, nicht erledigt werden kann. Der Übergang von einer zentralistischen Planwirtschaft zu einer funktionierenden Marktwirtschaft nach dem Zweiten Weltkrieg in Westeuropa ist ein Beispiel dafür, dass es durchaus erfolgreiche Planung in der Politik geben kann. Die Ordnung des Wettbewerbs wurde keineswegs spontaner Selbstorganisation überlassen, sondern war Gegenstand bewusster Gestaltung.

Die Internalisierung externer Effekte erfordert eine Lenkung der Marktwirtschaft. Im Falle einer Steuerlösung (Pigou) ist der Staat das Subjekt der Steuerung; im Falle

von Verhandlungslösungen (Coase) muss der Staat zumindest die Eigentumsrechte (an der Atmosphäre) definieren, damit überhaupt ein Markt für CO₂-Rechte entstehen kann. Mengen- und Steuerziele geben dem Markt ein Ziel vor, das er im BAU-Falle nicht verfolgen würde. All diese Zielvorgaben fungieren als Restriktionen in einem Optimierungsmodell und vermindern daher die Wohlfahrt. In diesem Sinne sind die Bedenken gegen eine Klimapolitik nachvollziehbar. Wichtiger ist jedoch, ob der ordnungspolitische Rahmen Innovationen freisetzen kann. Wir hatten gezeigt, dass durch Mengensteuerung von Emissionen sowohl die Investitionen in den Forschungs- und Entwicklungssektor zunehmen, als auch die steigenden Skalenerträge realisiert werden.

Ohne diese Definition und Durchsetzung von Eigentumsrechten an der Atmosphäre führen umweltpolitische Interventionen zu einer Fehlallokation von Mitteln: Der Kapitalstock in den verschiedenen Sektoren ist falsch dimensioniert, die Struktur des Wissenskapitals sub-optimal. Diese Sub-Optimalität führt wiederum zu staatlichen ad-hoc Interventionen. Definierte Eigentumsrechte hingegen führen zu einem Schattenpreis der Emissionen, der zugleich ein Signal ist für Investitionsentscheidungen. Um den Befürchtungen der Wirtschaft Rechnung zu tragen, der Schattenpreis der Emissionen könnte 200 Dollar pro Tonne Kohlenstoff überschreiten, ließe sich eine staatliche Garantie für eine Obergrenze des Zertifikatspreises vorstellen. Allerdings müsste der Zertifikatspreis eine ausreichend lange Zeit auf diesem Niveau bleiben können, bis das Mengenziel erreicht wird. Dieser Kompromissvorschlag ist aus klimapolitischer Sicht umso akzeptabler, je innovativer der Sektor der erneuerbaren Energien ist.

Globale Umweltpolitik hat hier die Aufgabe, der Wirtschaft eine Dynamik zu verleihen und damit ihre Resilience zu erhöhen. Die Wirtschaft ist dazu nicht selbst in der Lage, weil die Definition von Eigentumsrechten an der Atmosphäre ein Koordinationsproblem darstellt, dass weder eine einzelne Nation noch eine Firma für sich lösen kann; erst ein globales Umweltmanagement ist hierzu in der Lage. Es wird sicher noch lange Zeit dauern, bis sich der hierfür notwendige Rahmen geschaffen ist; kann aber gezeigt werden, dass und wie eine Umwelt(ordnungs-)politik Innovationen freisetzen kann, dann ist ein Argument gegen eine aktive Klimaschutzpolitik aus dem Weg geräumt.

Es lässt sich also durchaus auch ein Ordnungsrahmen für eine globale Umweltpolitik umreißen.

- Stabilisierung der Investitionserwartungen durch Vorgabe klarer Mengenziele. Für die Phase nach Kyoto ist es daher wichtig, dass es vor allem zu glaubwürdigen Reduktionszielen kommt; daher sollte der Zertifikatshandel über die Annex-I Länder hinaus erweitert werden. Den Märkten muss ein klares Signal gegeben werden, dass für die Nutzung der Atmosphäre ein Preis bezahlt werden muss. Die formulierten Reduktionsziele müssen glaubhaft sein, brauchen aber nicht zu ehrgeizig sein. Von bürokratischen Investitionslenkungsprogrammen wie dem CDM wird man wenig erwarten dürfen. Die Entwicklungsländer werden sich jedoch nur dann zu Emissionsverpflichtungen bewegen lassen, wenn ihnen die Industrieländer Kompensationen anbieten (z.B. Entschuldung). Es wird darauf ankommen zu zeigen, unter welchen Bedingungen die Entwicklungsländer vom Zertifikatshandel profitieren können. Dies lässt sich in der derzeit vorliegenden Version von MIND nicht durchrechnen; hierzu bedarf es einer regionalen Auflösung.
- Bereitstellung von Risikokapital für erneuerbare Energien ist wichtig, damit die steigenden Skalenerträge möglichst schnell realisiert werden können.
- Technische Optionen, deren Erwartungsschaden einfach nicht bekannt ist oder zu hoch ist, wie die Ozeansequestrierung, sollten verboten werden.
- Billige technische Optionen, mit deren Hilfe Zeit gewonnen werden kann, sollten experimentell erprobt werden.
- Die Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen zur Erhöhung der Energieeffizienz sollten erhöht werden.

Anhang A

Parameterwerte und Sensitivitätsanalyse

Die Wahl der Parameterwerte stellt in jedem Modell ein Problem dar. MIND ist ein langfristig orientiertes Modell. Daher ist eine realistische Abschätzung von Parameterwerten, wie z.B. dem Potential einer Technologie, schwierig, da wir heute nicht wissen können, wie viel in den nächsten Jahrzehnten entdeckt werden wird. MIND ist kein Prognosemodell. Vielmehr sollen optimale und nicht wahrscheinliche Pfade berechnet werden. Es werden Fragen der Art gestellt: Was soll man in einer bestimmten, vorgestellten Welt tun, damit die vorgegebenen Ziele erreicht werden? Und nicht Fragen von der Art: Mit welcher Entwicklung von Wirtschafts- und Energiesystem ist wahrscheinlich zu rechnen? Mit MIND sollen Empfehlungen abgeleitet werden, wie das System gesteuert werden soll. Bei Prognosemodellen werden Empfehlungen abgeleitet, die entweder über nicht beeinflussbare, kurz- bis mittelfristig Entwicklungen Aufschluss geben oder Szenarien der Art berechnen *was passiert wenn*.

Die Unsicherheit über die relevanten Parameter macht eine Sensitivitätsanalyse notwendig. Mit der Sensitivitätsanalyse soll untersucht werden, wie die Variation von Parameterwerten auf die Pfade der Steuergrößen wirken.

Es wird in Zukunft darauf ankommen, Unsicherheitsbereiche der Parameter durch statistische Untersuchungen und Expertenbefragungen zu verbessern. Es ist eine große Herausforderung, die ökonometrischen und theoretisch-ökonomischen Herangehensweisen besser aufeinander abzustimmen. Das bezieht sich auf die rein methodischen Fragen der Modellierung genauso wie auf die der Datenerhebung.

MIND kann kann zwar die stilisierten Fakten des Wachstums in qualitativer und quantitativer Hinsicht gut reproduzieren. Die Parametrisierung der verwendeten Funktionen mittels ökonomischer Methoden steht aber noch aus. In Tabelle A.1 werden wir - ohne ausgiebige Diskussion - die exogen zu setzenden Parameterwerte wiedergeben, wie sie in der vorliegenden Version verwendet werden. Wir haben in Kapitel 4 verschiedene Szenarien gerechnet, deren Parameterwerte in den beiden Tabellen des Anhangs dokumentiert sind.

Der Referenzfall ist in Tabelle A.1 dokumentiert. In Tabelle A.2 wurde die Sensitivitätsanalyse zusammengefasst.

Die Tabellen sind wie folgt gegliedert. Die Blöcke bezeichnen die Untersuchungsfelder, die in der 1. Spalte bezeichnet werden, z.B.: Ressourcenbasis. In jedem Untersuchungsfeld wird dokumentiert, welcher Parameter (2. Spalten) welche Ausprägungen annimmt (3. Spalte) und welches Akronym verwendet wurde (4. Spalte). In der 5. Spalte wird nochmals die Idee erläuternd zusammengefasst. Für jeden Fall wurde das BAU und das UmBAU Szenario gerechnet. Als erstes haben wir den Einfluss einer veränderten Ressourcenbasis untersucht. Interesseleitend hierfür war die Auswirkung der Erhöhung des technischen Fortschrittes im Ressourcensektor. Wir haben den Parameter ξ_3 von 3500 GtC auf 5000 GtC erhöht. Dadurch können die Lerngewinne länger beibehalten werden; der Ressourcenverknappungseffekt schlägt erst später zu Buche.

Im Bereich des Lernens im erneuerbaren Energiesektor haben wir drei Untersuchungen gemacht. Zunächst haben wir die Geschwindigkeit des Lernens variiert, indem wir den Parameter τ_{res} erhöht und vermindert haben. Damit unterscheiden wir neben dem BAU Szenario nach *schnellem* und *langsamem* Lernen. Als zweites haben wir das Lernpotential verändert, indem wir den Parameter κ_{ren}^{max} erhöht und vermindert haben. So können wir zwischen *hohem* und *niedrigem* Lernpotential unterscheiden. Zuletzt haben wir zwischen *gutem* und *schlechtem* Lernen unterschieden, indem wir die die Kombinationen schnelles Lernen mit hohem Potential, sowie langsames Lernen mit geringem Potential gebildet haben.

In einem weiteren Block haben wir uns für den Einfluss von Leitplanken, Klimavariablen und den Annahmen über die Entwicklung der ATHG interessiert. Für das Klimafenster wurde das ursprüngliche WBGU-Fenster angenommen und zwei weitere, bei denen die Restriktionen auf 2.5⁰C und 0.25⁰C/dek bzw. 3⁰C und 0.3⁰C/dek gesetzt wurden. Für die Klimavariablen wurde die Klimasensitivität T_{Sens} in Über-

einstimmung mit den Angaben im IPCC TAR variiert. Im BAU Szenario ist die Klimasensitivität 2.8°C . Im Fall mit geringem T_{Sens} wurde sie auf 1.7°C und im Fall mit hohem T_{Sens} auf 4.8°C gesetzt. Bei der Behandlung der ATHG gibt es zwei Varianten. Entweder wurden die Emissionen der ATHG auf dem Niveau von 2000 eingefroren (*Freeze*) oder es wurden die Emissionen und die daraus resultierenden Änderungen des Strahlungsantriebes des Szenarios B2 verwendet. Im BAU Szenario wird das Szenario Freeze verwendet. Um die Übereinstimmung zu wahren, wurden die geringfügigen Änderungen in k_{diff} ebenfalls berücksichtigt.

Um die Bedeutung des technischen Wandels zu berücksichtigen, wurde der Optionenfächer in MIND eingeschränkt. Im BAU Szenario und dem entsprechenden UmBAU Szenario werden die Optionen *Erhöhung der Energieeffizienz durch R&D*, sowie *Umbau des Energiesystems* einzeln und kombiniert ausgeschaltet. Dadurch wird die Bedeutung der beiden Optionen im Hinblick auf die Klima- und Energiepolitik deutlich.

Zuletzt haben wir den Einfluß der Produktivität im Forschungssektor zur Steigerung der Energieproduktivität untersucht. Dabei wird der Parameter α_B variiert.

Tabelle A.1: Parameterwerte in MIND

Zielfunktion	ρ	0.01	τ_{res}	100	
	τ_0	1965	κ_{res}^{max}	2	
	τ_1	1995	κ_{res}^0	1.29	
	τ_2	2300	β_{ers}	0.4	
Aggregierter Produktionssektor	σ_A	0.5	Fossiler	χ_1	113
	ξ_A^L	0.65	Ressourcen-	χ_2	700
	ξ_A^K	0.3	sektor	χ_3	3500
	ξ_A^E	0.05		χ_4	4
	Φ_A	0.41		δ_{res}^K	0.05
	δ_A^K	0.05		K_{res}^0	5
	K_A^0	60			
R&D-Sektoren	α_A	0.91		τ_{ren}	250
	β_A	0.4		κ_{fos}^{max}	3
	γ_A	0.05	Erneuerbarer	κ_{res}^0	0.25
	δ_A	-0.01	Energiesektor	β_{ren}	0.4
	A_0	10.6		ω_1	1 ¹
	α_B	0.97		ω_2	0.9
	β_B	0.4		ω_3	0.8
	γ_B	0.05		ω_4	0.7
	δ_B	-0.01		ω_5	0.6
	B_0	20.5		ω_6	0.5
Fossiler Energiesektor	σ_{fos}	0.5	Exogene	$L(t)$	SRES B2
	ξ_{fos}^R	0.7	Szenarien	$E_{LU}(t)$	SRES B2
	ξ_{fos}^K	0.3		$F_{ATHG}(t)$	Freeze
	Φ_{fos}	0.72		σ	0.0215
	δ_{fos}^K	0.05		$F_{2 \times CO_2}$	3.7
	K_{fos}^0	5		$F_{0SO_2}^{direkt}$	-0.8
			Klima-	$F_{0SO_2}^{indirekt}$	-0.3
			system	$T_{2 \times CO_2}$	2.8
				k_{diff}	2.8
				B	0.00151

Tabelle A.2: Sensitivitätsanalyse

Modellbereich	Parameter	Variation	Akronym	Erläuterung
Ressourcenbasis	χ_3	3500 5000	BAU HR	B usiness A s U sual H igh R esource B ase
Lernen im Erneuerbaren Energiesektor	τ_{ren}	500	SL	S low L earner
		250	BAU	B usiness A s U sual
		100	FL	F ast L earner
	κ_{ren}^{max}	2	LP	L ow P otential
		3	BAU	B usiness A s U sual
		4	HP	H igh P otential
$\tau_{ren}, \kappa_{ren}^{max}$	500, 2	BL	B ad L earner	
	250, 3	BAU	B usiness A s U sual	
	100, 4	GL	G ood L earner	
Klimafenster Klimasensitivität ATHG	$GR_T, GR_{\dot{T}}$ T_{Sens} F_{ATHG}	2.5, 0.25; 2.8; Fr	BAU	B usiness A s U sual
		3.0, 0.30; 4.2; Fr	LHF	L arge, H igh, F reeze
		3.0, 0.30; 2.8; B2	LMB	L arge, M ean, B 2
		3.0, 0.30; 1.7; B2	LLB	L arge, L ow, B 2
		2.0, 0.20; 1.7; Fr	WLF	W BGU, L ow, F reeze
		3.0, 0.30; 2.8; Fr	LMF	L arge, M ean, F reeze
Technologische Strategien	$I_{ren}(t)$ $RD_B(t)$	$S = \text{On}, E = \text{On}$	BAU	Alle Strategien
		$S = \text{On}, E = \text{Off}$	SO	Keine Effizienzerhöhung
		$S = \text{Off}, E = \text{On}$	OE	Kein Umbau
		$S = \text{Off}, E = \text{Off}$	OO	Weder, noch
Steigerung der Energieeffizienz	α_B	0.85	LRD	Geringe Produktivität
		0.9	BAU	B usiness A s U sual
		0.95	HRD	Hohe Produktivität

Anhang B

Das Klimamodul

Das an Mind gekoppelte Klimamodell beschreibt die Reaktion der globalen Mitteltemperatur auf eine anthropogene Störung des Strahlungshaushalts relativ zum vorindustriellen Gleichgewicht (atmosphärische CO_2 -Konzentration C_o , globale Mitteltemperatur T_o). In seiner erweiterten Form behandelt das Klimamodell die anthropogenen Emissionen von Kohlendioxid (CO_2) und Sulphataerosolen (SO_2) direkt. Emissionen anderer Treibhausgase (Methan, Distickstoffoxid, synthetische Treibhausgase, Ozon-Vorläufersubstanzen, vgl. Kap. 3.1) können nur indirekt durch die exogenen Vorgabe des resultierenden Strahlungsantriebs in die Analyse einbezogen werden.

Die CO_2 -Emissionen E_{CO_2} werden zunächst mit Hilfe eines einfachen Boxmodells in eine Anomalie der atmosphärischen CO_2 -Konzentration übersetzt.

$$\frac{d(C - C_o)}{dt} = \beta E_{\text{CO}_2} + B \hat{E}_{\text{CO}_2} - \sigma (C - C_o) \quad (\text{B.1})$$

Umrechnungsfaktor $\text{GtC} \rightarrow \text{ppm}$ $\beta = 0.47 \text{ ppm/GtC}$

Abklingrate der CO_2 -Konzentration $\sigma = 0.0215 \text{ 1/a}$

In der Atmosphäre verbleibendes Residuum $\frac{B}{\beta \sigma} = 0.15$

Durch das Auftreten der kumulierten Emissionen \hat{E}_{CO_2} in Gleichung (B.1) wird langfristig nicht der gesamte anthropogene Eintrag vom Ozean aufgenommen, sondern es verbleibt in der Atmosphäre ein Residuum von $B/(\beta \sigma) \cdot \hat{E}_{\text{CO}_2}$.

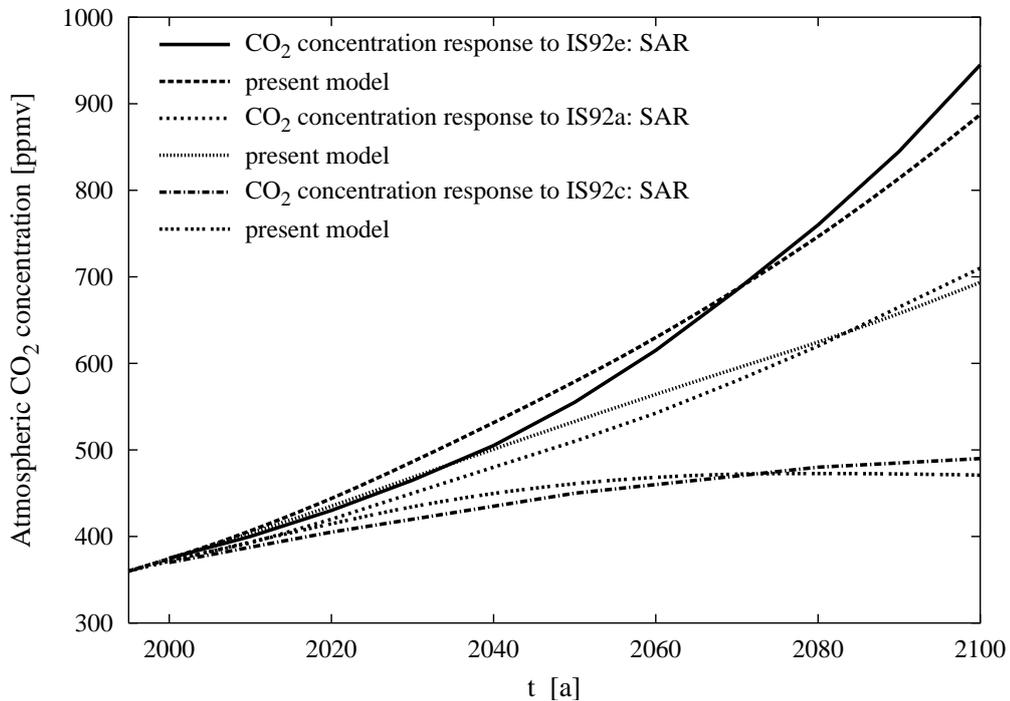


Abbildung B.1: Modellierte Reaktion des Kohlenstoffkreislaufes auf IS92-Emissionen im Vergleich mit Projektionen aus dem Second Assessment Report (SAR) des IPCC.

Da Gleichung (B.1) nur eine Zeitskala für die CO_2 -Bindung im Land-Ozean-Reservoir abbildet, wird sie die schnelle Aufnahme durch die Biosphäre unterschätzen und die langfristige Aufnahme durch den Ozean überschätzen. Bei Hochemissionsszenarien treten zusätzlich Sättigungseffekte ein, die in der linearen Näherung nicht repräsentiert sind. Trotz ihres vereinfachenden Charakters kann Gleichung (B.1) die Reaktion der CO_2 -Konzentration auf verschiedene Emissionsszenarien in einem für diese Analyse ausreichenden Maße wiedergegeben. Abb. B.1 illustriert das anhand eines Vergleiches mit den Projektionen im Second Assessment Report (SAR) des IPCC [Schimel et al., 1996].

Eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre stört das im gegebenen Modellrahmen hypothetisierte Strahlungsgleichgewicht in der vorindustriellen Zeit. Um Sättigungseffekte abzubilden, wird der daraus resultierende Strahlungsantrieb F_{CO_2} in logarithmischer Abhängigkeit von der CO_2 -Konzentration dargestellt. Den entgegenwirkende Beitrag der Sulphataerosole F_{SO_2} berechnen wir in direkter

Abhängigkeit von den Emissionen (vgl. Bruckner et al. [2002]), da diese Partikel nur eine sehr kurze Verweildauer in der Atmosphäre haben. Der Strahlungsantrieb anderer Treibhausgase F_{ATHG} kann durch Vorgabe eines exogenen Szenarios in die Analyse einbezogen werden. Der gesamte Strahlungsantrieb setzt sich somit wie folgt zusammen:

$$F_{CO_2} = F_{2 \times CO_2} \frac{\ln(C/C_o)}{\ln 2}$$

Strahlungsantrieb bei CO_2 -Verdopplung $F_{2 \times CO_2} = 3.7 \text{ W/m}^2$

$$F_{SO_2} = F_{o\ SO_2}^{\text{direkt}} \frac{E_{SO_2}}{E_{o\ SO_2}} + F_{o\ SO_2}^{\text{indirekt}} \ln\left(1 + \frac{E_{SO_2}}{E_{\text{nat}\ SO_2}}\right) / \ln\left(1 + \frac{E_{o\ SO_2}}{E_{\text{nat}\ SO_2}}\right)$$

Direkter Beitrag der Sulphataerosole in 1990 $F_{o\ SO_2}^{\text{direkt}} = -0.8 \text{ W/m}^2$

Inirekter Beitrag der Sulphataerosole in 1990 $F_{o\ SO_2}^{\text{indirekt}} = -0.3 \text{ W/m}^2$

F_{ATHG} exogen vorgegeben

$$F_{tot} = F_{CO_2} + F_{SO_2} + F_{ATHG} \quad (\text{B.2})$$

Abb. B.2 vergleicht den aus Gleichungen (B.1) und (B.2) berechneten Strahlungsantrieb für die SRES Szenarien B2 und A2 [Nakićenović and Swart, 2000] mit den korrespondierenden Projektionen im Third Assessment Report (TAR) des IPCC. Die Pfade stimmen gut überein. Zum Ende des Jahrhunderts fällt der Strahlungsantrieb aufgrund der von Gleichung (B.1) modellierten geringeren CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre etwas gegenüber den TAR-Projektionen zurück.

Die Reaktion der globalen Mitteltemperatur T auf den Strahlungsantrieb F_{tot} wird mit einem einfachen Energiebilanzmodell bestimmt [Dutton, 1995, Watterson, 2000].

$$\frac{d(T - T_o)}{dt} = \frac{1}{C_{oc}} \left(F_{tot} - F_{2 \times CO_2} \frac{T - T_o}{T_{2 \times CO_2}} \right) \quad (\text{B.3})$$

Klimasensitivität $T_{2 \times CO_2} \in \{1.7, \mathbf{2.8}, 4.2\} \text{ K}$

Wärmekapazität des Ozeans C_{oc}

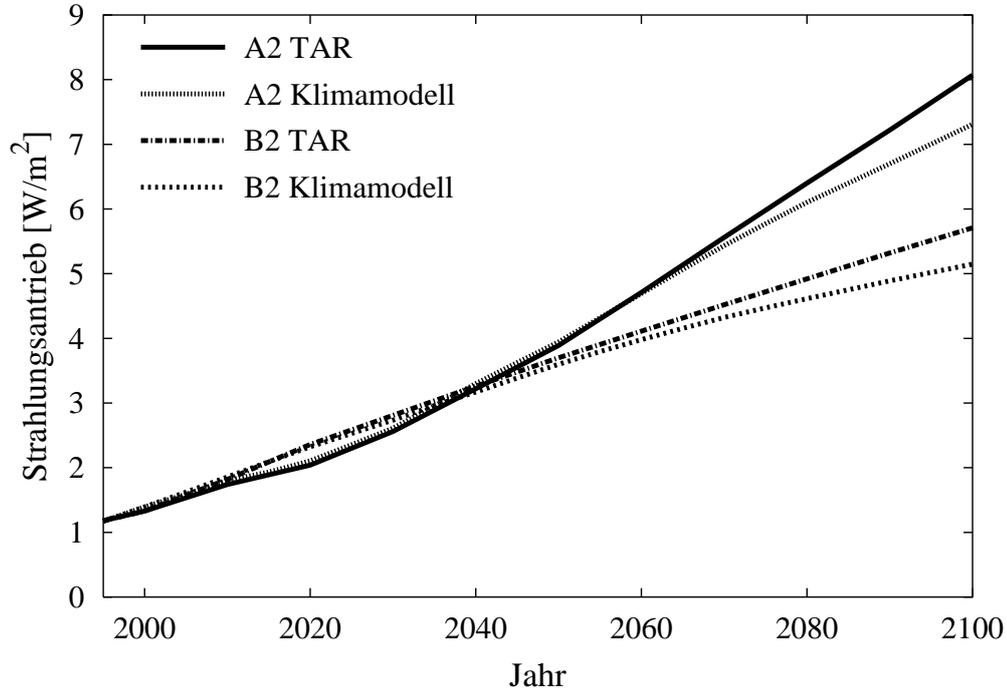


Abbildung B.2: Modellierter Strahlungsantrieb der SRES A2 und B2 Szenarien im Vergleich mit den Projektionen aus dem Third Assessment Report (TAR) des IPCC.

Die Klimasensitivität $T_{2 \times CO_2}$ bestimmt die Höhe des Temperaturanstiegs im Gleichgewicht, während die Wärmekapazität des Ozeans C_{oc} die Geschwindigkeit der transienten Temperaturantwort maßgeblich beeinflusst. Der Ausgleich des Strahlungsungleichgewichts durch die Erhöhung der Temperatur geschieht auf der Zeitskala

$$\tau = C_{oc} \frac{T_{2 \times CO_2}}{F_{2 \times CO_2}} \quad (\text{B.4})$$

Zur Bestimmung der ozeanischen Wärmekapazität haben wir einen Vergleich mit einem einfachen Upwelling/Diffusion-Modell des Ozeans herangezogen [Dickinson and Schaudt, 1998]. Der TAR benutzt für die Projektion möglicher Temperaturentwicklungen im 21. Jahrhundert [Cubasch and Meehl, 2001] das Modell MAGICC, das einen Upwelling/Diffusion-Ozean beinhaltet [Raper et al., 2001]. Daher enthalten die im TAR benutzten Parametersätze aus den MAGICC-Emulationen verschiedener gekoppelter Atmosphäre-Ozean Zirkulationsmodelle (AOGCM) nicht die im Rahmen der Energiebilanzmodelle relevante(n) Wärmekapazität(en) (bzw. Schichtdick(en) des Ozeans), sondern die im Rahmen der Upwelling/Diffusion-

Modelle relevante vertikale Diffusivität [Cubasch and Meehl, 2001, Tabelle 9.A1, S. 577]. Ein Vergleich der beiden Modellrahmen erlaubt es, in erster Näherung einen Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen herzustellen. Dies kann allerdings nur eine grobe Näherung sein, da eine Störung im Strahlungsgleichgewicht an der Ozeanoberfläche bei Annahme eines einschichtigen Ozeans nur auf einer Zeitskala abnimmt (vgl. Gleichung B.4), während bei Annahme eines Upwelling/Diffusion-Ozeans die Störung auf einem Kontinuum von Zeitskalen von anfänglich sehr schnell bis langfristig sehr langsam abklingt.

Aus dem Kontinuum an Zeitskalen identifizieren Dickinson and Schaudt [1998] drei besonders prominente Zeitkonstanten.

1. τ_u ist die Zeit, die das Tiefenwasser benötigt, um von der Thermokline des Upwelling/Diffusion-Ozeans an die Oberfläche zu gelangen, bzw. die eine Wärmestörung an der Oberfläche benötigt, um bis zur Thermokline zu diffundieren.
2. $\tau_c < \tau_u$ ist die langfristige Abklingzeit der Oberflächentemperatur bei einer Störung des Strahlungsantriebs, die aus der Berücksichtigung der gesamten Ozeanschicht von Oberfläche bis Thermokline des Upwelling/Diffusion-Ozeans hervorgeht (Schichtdicke = Tiefe der Thermokline d_{th}).
3. $\tau_a < \tau_c$ ist die transiente Abklingzeit der Oberflächentemperatur bei einer Störung des Strahlungsantriebs, die aus der Berücksichtigung der Ozeanschicht von Oberfläche bis zu einer Tiefe $d_{tr} = \tau_c/\tau_u d_{th}$ hervorgeht. d_{tr} ist die Tiefe, bis zu der eine Wärmestörung an der Oberfläche vordringen kann, bevor sie durch Anstieg der Oberflächentemperatur gedämpft wird.

Folgen wir nun Dickinson and Schaudt [1998] und legen die transiente Abklingzeit τ_a als Zeitskala unseres einfachen Energiebilanzmodells zugrunde, so erhalten wir für die ozeanische Wärmekapazität:

$$C_{oc} = c_{oc} \cdot d_{tr} = c_{oc} \cdot c_{oc} k_{diff} \frac{T_{2 \times CO_2}}{F_{2 \times CO_2}} \quad (\text{B.5})$$

Wärmekapazität von einem Kubikmeter Meerwasser $c_{oc} = 0.09 \text{ Wa/m}^3\text{K}$

Vertikale Diffusivität $k_{diff} = 2.3 \text{ cm}^2/\text{s}$

Gleichung (B.5) liefert die gesuchte Näherung, die die ozeanische Wärmekapazität im Energiebilanzrahmen und die Diffusivität im Upwelling/Diffusion-Modell in einen funktionalen Zusammenhang stellt. Darüberhinaus wird in Übereinstimmung mit dem TAR ein positiver Zusammenhang zwischen ozeanischer Wärmekapazität und Klimasensitivität abgebildet (vgl. Cubasch and Meehl [2001]). Für eine Klimasensitivität im Bereich $T_{2\times CO_2} = [1.7, 4.2]$ K liegt die ozeanische Wärmekapazität im Intervall $C_{oc} = [27.8, 66.7]$ Wa/m²K.

Abb. B.3 und B.4 vergleichen die Temperaturantwort des Klimamodells auf die SRES Emissionsszenarien B2 and A2 [Nakićenović and Swart, 2000] mit den Projektionen des TAR [Cubasch and Meehl, 2001]. Das Ensemblemittel der sieben, in den TAR eingeflossenen AOGCM-Emulationen wird mit dem Temperaturpfad für den Parametersatz ($k_{diff} = 2.3$ cm²/s, $F_{2\times CO_2} = 3.7$ W/m², $T_{2\times CO_2} = 2.8$ K) verglichen. Der Wert $T_{2\times CO_2} = 2.8$ K entspricht dem Ensemblemittel der Klimasensitivität, die innerhalb des AOGCM-Ensembles zwischen 1.7 (PCM DOE) und 4.2 K (GFDL) schwankt (vgl. Cubasch and Meehl [2001, Tabelle 9.A1, S. 577]). Die vom TAR spezifizierte Ensemble-Bandbreite für die globale Mitteltemperatur im Jahr 2100 ist durch einen vertikalen Balken gekennzeichnet. Zum Vergleich zeigen wir die hohe und niedrige Temperaturantwort des Klimamodells für die gegebenen Parametersätze des Ensembles. Sowohl die mittleren Temperaturpfade als auch die Intervalle der möglichen Temperaturwerte im Jahr 2100 stimmen gut mit den TAR-Projektionen überein. Im Fall des Szenarios SRES A2 kann man sehen, dass die Dämpfung der Temperaturantwort bei hohen Klimasensitivitäten durch den linearen Zusammenhang (B.5) leicht überschätzt wird.

Es sei an dieser Stelle hervorgehoben, dass das einfache Klimamodell (Gleichungen B.1-B.3) eine quasi-lineare Näherung der komplexen Klimareaktion auf eine anthropogene Störung darstellt, die speziell für den Einsatz in gekoppelten, der Optimierung zugänglichen Klima-Ökonomiemodellen konzipiert ist. Während das Modell auf diese Weise einen integrierten, den Klimaschutz umfassenden Blick auf die Transformation des Energiesystems eröffnen kann, ist es für eine klassische Simulationsanalyse möglicher Klimaantworten auf vorgegebene Emissionsszenarien nur eingeschränkt geeignet (siehe Kapitel 3.1). Wie bereits angedeutet, überschätzt das Modell für Hochemissionsszenarien die CO₂-Aufnahme durch die natürlichen Reser-

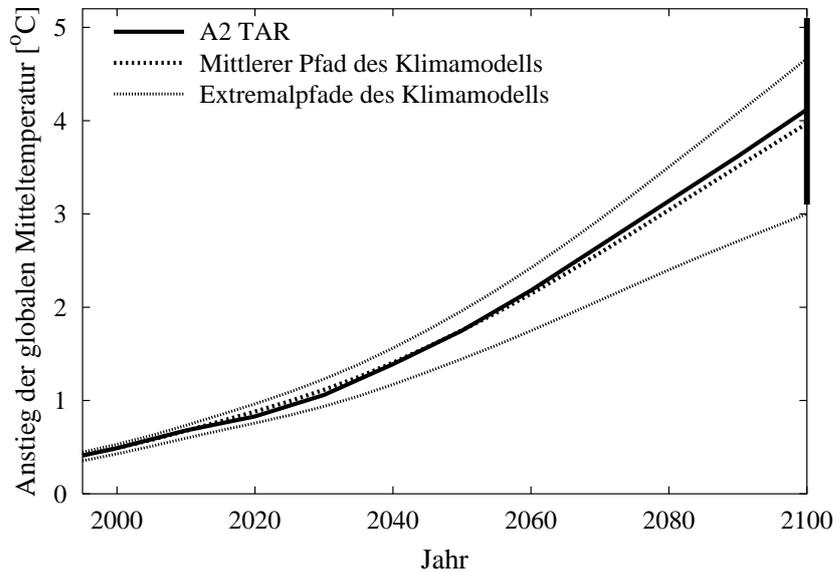


Abbildung B.3: Bandbreite und mittlerer Pfad der modellierten Temperaturantwort auf das SRES A2 Emissionsszenario. Zum Vergleich ist die TAR-Projektion für das AOGCM-Ensemblemittel und die Ensemblebandbreite im Jahr 2100 (schwarzer Balken) gezeigt.

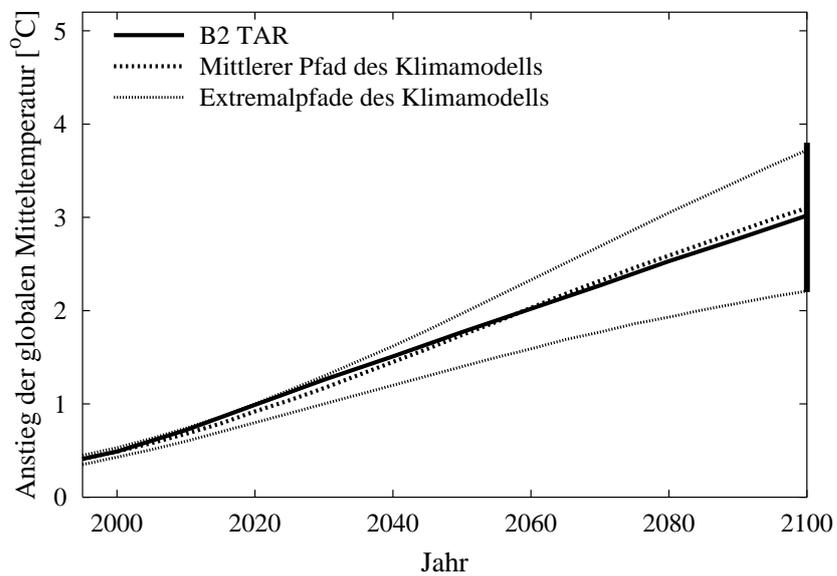


Abbildung B.4: Bandbreite und mittlerer Pfad der modellierten Temperaturantwort auf das SRES B2 Emissionsszenario im Vergleich mit der Projektion aus dem TAR.

voirs Ozean und Biosphäre, was in diesen Fällen zu etwas niedrigeren Projektionen der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre führt. Darüberhinaus spiegelt Gleichung (B.3) den transienten Temperaturverlauf zwar relativ gut wieder, wird aber für einen ins Gleichgewicht kommenden Strahlungshaushalt die langfristige Klimaantwort unterschätzen. Angesichts dieser beiden Eigenschaften ist zu berücksichtigen, dass der vom Klimamodell projizierte Temperaturpfad eher eine konservative Schätzung bei hohen Emissionen und auf langen Zeitskalen ist.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Idealtypische Kosten-Nutzen Analyse: Die marginalen Erwartungskosten der Vermeidung verlaufen relativ steil, die der marginalen Erwartungsschäden relativ flach.	10
2.2	Die Erwartungsschäden können gegen Unendlich konvergieren.	12
2.3	„Manna from the Heaven“ verschiebt die Last der Emissionsreduktion in die Zukunft	13
2.4	Vergleich von Kosten-Effektivitäts-Analyse und Kosten-Nutzen Analyse	15
2.5	Technischer Fortschritt vermindert Wohlfahrtsverluste	16
3.1	Strahlungsantrieb ohne und mit anderen Treibhausgasen	27
3.2	Klimareaktion auf vier verschiedene Emissionsszenarien	29
3.3	Die BAUER-KAYA Identität zeigt die fünf grundlegenden Vermeidungsoptionen.	32
3.4	KAYA-Formel nach Weltregionen.	32
3.5	Schätzungen weltweiter Lagerpotentiale für anthropogenes CO ₂	44
4.1	Verlauf der Lernkurve	65
4.2	Risikomatrix für erneuerbare Energien: Das Lernpotential wird gegen die Lerngeschwindigkeit abgetragen	69
4.3	Der Output steigt mit positiver Wachstumsrate	72
4.4	Die Arbeitsproduktivität steigt schneller als die Energieproduktivität	73
4.5	Die Kapitalintensität zeigt ebenfalls ein exponentielles Wachstum . . .	73
4.6	Der Kapitalkoeffizient und damit auch der Zins ist konstant	74
4.7	Die Einkommensquoten sind stabil	74
4.8	Der Anteil erneuerbarer Energie an der gesamten Primärenergieproduktion nimmt zu	75

4.9	Die Energieintensität sinkt	76
4.10	Die Kohlenstoffintensität sinkt	76
4.11	Die Emissionen steigen an, flachen jedoch wegen der sinkenden Energie- und Kohlenstoffintensität ab. Diese wiederum nimmt ab, weil sich zum Ende des Jahrhunderts die steigenden Extraktionsgrenzkosten fossiler Energie bemerkbar machen.	77
4.12	Klimafenster	77
4.13	Die Environmental Kuznets Kurve	81
4.14	Durch beschleunigtes Lernen werden die Konsumverluste einer Klimaleitplanke drastisch vermindert.	84
4.15	Je schneller der erneuerbare Energiesektor lernt, umso schneller sinkt auch die Energieintensität	84
4.16	Je schneller der erneuerbare Energiesektor lernt, umso schneller steigt sein Marktanteil	85
4.17	Der Schattenpreis der Emissionen im UmBAU Szenario	86
4.18	Die Eigentumsrechte bzw. die Ressourcenrenten erodieren	87
4.19	Die Verminderung des Kapitalkoeffizienten in Abhängigkeit von der kumulierten Ausbringungsmenge	87
4.20	Die Renten der Ressourcenbesitzer lassen sich durch die Forcierung des technischen Fortschritts im Extraktionssektor steigern, wenn es keine Klimaleitplanke gibt	88
4.21	Bei Einführung einer Klimaleitplanke hat der höhere technische Fortschritt im Extraktionssektor keine Wirkung	89
4.22	Umbau des Energiesystems und Klimasensitivität	90
4.23	Temperaturfenster und Klimasensitivität	90
4.24	Emissionsverlauf und Klimasensitivität	91
4.25	Die Erhöhung der Energieeffizienz reicht aus für ein dauerhaftes Wachstum, jedoch mit erheblichen Wachstumseinbußen	92
4.26	Die Ressourcenbesitzer können durch den technischen der Erneuerbaren enteignet werden, wenn sie mit einer Klimaschranke konfrontiert sind	97
5.1	Leitplankensetzung auf dem Kontinuum des Klimawandels.	102
5.2	Leitplankenbegrenzung der Emissionspfade	108
5.3	Emissionskorridore im Vergleich	109

5.4	Zeitlicher Spielraum für Transformation des Energiesystems	111
5.5	Energiemix ohne und mit Emissionsbeschränkung	112
5.6	Verlauf der Emissionen bei unterschiedlicher Lerngeschwindigkeit und unterschiedlicher Dauer der Reduktionsverpflichtung	117
5.7	Erreichtes Klimafenster bei unterschiedlicher Lerngeschwindigkeit und unterschiedlicher Dauer der Reduktionsverpflichtung	118
5.8	Transformationspfade zum Umbau des Energiesystems	119
5.9	Einfluss der Ressourcenbasis und des Lernens auf den Umbau des Energiesystems für das BAU-Szenario und für eine lange und hohe Reduktionsverpflichtung	120
5.10	Konsumverluste bei einer hohen Emissionsverpflichtung	121
5.11	Transformationszeitpunkte bei unterschiedlichen Szenarien	121
5.12	Investitionen ohne und mit Emissionsobergrenze	123
5.13	Schattenpreis der Emissionen für verschiedene Technologieparameter .	124
6.1	Fatalisten und Manager	127
B.1	Reaktion des Kohlenstoffkreislaufes auf IS92-Emissionen	140
B.2	Strahlungsantrieb der SRES A2 und B2 Szenarien	142
B.3	Temperaturantwort auf das SRES A2 Emissionsszenario	145
B.4	Temperaturantwort auf das SRES B2 Emissionsszenario	145

Tabellenverzeichnis

3.1	Die limitierenden Faktoren bei den erneuerbaren Energien	39
5.1	Acht Szenarien für bindende Emissionsbeschränkungen in der Post-Kyoto-Zeit	114
A.1	Parameterwerte in MIND	137
A.2	Sensitivitätsanalyse	138

Literaturverzeichnis

- Ph. Aghion and P. Howitt. *Endogenous Growth Theory*. MIT Press, Cambridge, MA., 1997.
- J. Alcamo and E. Kreileman. Emission scenarios and global climate protection. *Global Environmental Change*, 6:305–334, 1996.
- R. Barro and X. Sala-I-Martin. *Economic Growth*. McGraw-Hill, New York, 1995.
- N. Bauer and C. Flachsland. Carbon Capturing and Sequestration. PIK Working Paper, 2002.
- D.J. Bayless. Enhanced Practical Photosynthetic CO₂ Mitigation. Presented at 1st National Conference on Carbon Capturing and Sequestration, Washington, D.C., 2001.
- W. Beckermann. *Small is stupid. Blowing the Whistle on the Greens*. Duckworth, London, 1995.
- H.P. Binswanger. A Microeconomic Approach to Induced Innovation. *The Economic Journal*, 84:940–958, 1974.
- J. Bongaarts. Population Policy Options in the Developing World. *Science*, 263:771–776, 1994.
- L. Brookes. Energy Efficiency and Economic Fallacies. *Energy Policy*, 18:199–201, 1990.
- T. Bruckner, G. Hooss, H. M. Füßel, and K. Hasselmann. Climate system modeling within the framework of the tolerable windows approach: The ICLIPS integrated climate model. *Climatic Change*, 2002. Submitted.

- T. Bruckner, G. Petschel-Held, F. L. Tóth, H. M. Füßel, C. Helm, M. Leimbach, and H. J. Schellnhuber. Climate change decision support and the tolerable windows approach. *Environmental Modeling and Assessment*, 4:217–234, 1999.
- U. Chakravorty, J. Roumasset, and K.-P. Tse. Endogenous Substitution among Energy Resources and Global Warming. *Journal of Political Economy*, 105:1201–1234, 1997.
- U. Cubasch and G. Meehl. Projections of future climate change. In J. Houghton and Y. Ding, editors, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC, pages 525–582. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- R. E. Dickinson and K. J. Schaudt. Analysis of timescales of response of a simple climate model. *Journal of Climate*, 11:97–107, 1998.
- J. A. Dutton. An analytical model of atmospheric feedback and global temperature change. *Journal of Climate*, 8:1122–1139, 1995.
- O. Edenhofer. *Das Management globaler Allmenden*. In: Umweltsoziologie. Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Sonderheft 36. Eds.: Diekmann, A. und Jaeger, C.C., 1996a.
- O. Edenhofer. Optimal Growth, Bias, Technological Change and Sustainable Development. Paper presented at the Workshop on Economic Modelling of Environmental Policy and Endogenous Technological Change, 2000.
- O. Edenhofer and C.C. Jaeger. Power shifts: the dynamics of energy efficiency. *Energy Economics*, 20:513–537, 1998.
- O. Edenhofer and M. Rohner. *Ökonomie und Klimawandel: Kann sich die Klimapolitik auf die Kosten-Nutzen Analyse verlassen?* in: Klimapolitik. Ed.: Brauch, H.G.; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1996b.
- P. Freund and W.G. Ormerod. Progress Towards Storage of Carbon Dioxide. *Energy Conversion & Management*, 38:199–204, 1997.
- U. Fuentes. Langfristige Szenarien und Visionen. Ideen für Kapitel 4. Internes Arbeitspapier (IAP), 2000.

- L. Goulder and K. Mathai. Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 39:1–38, 2000.
- M. Grubb. Energy Efficiency and Economic Fallacies - A Reply. *Energy Policy*, 18: 783–785, 1990.
- M. Grubb. Who’s afraid of atmospheric stabilisation? Making the link between energy resources and climate change. *Energy Policy*, 29:837–845, 2001.
- H. Herzog, E. Drake, and E. Adams. CO₂ Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change - A White Paper. Department of Energy (DOE) Order No. DE-AF22-96PC01257, 1997.
- J.R. Hicks. *The Theory of Wages*. London, 1963.
- IIASA. Technological Development: ECS Contribution to the ICLIPS Project. Forschungsbericht an das Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK), 2001.
- P. Imboden. *Integrated Assessment*. 2000.
- P. Imboden and C.C. Jaeger. Towards a Sustainable Energy Future. In: *Energy. The Next 50 Years*. Published by the OECD, 1999.
- IPCC Working Group III. *Climate Change 2001. Mitigation*. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- H.D. Jacoby and A.D. Ellerman. The „Safety Value“ and Climate Policy. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report No.83, 2002.
- C. Jones and J. Williams. Too much of a good thing? The economics of investment in R&D. *Journal of Economic Growth*, 5:65–85, 1997.
- N. Kaldor. Capital Accumulation and Economic Growth. In *Proceedings of a Conference Held by the International Economic Association*, London, 1963. Macmillan.
- Ch. Kennedy. Induced Innovation and the Theory of Distribution. *Economic Journal*, 74:541–547, 1964.

- J.D. Khazzoom. Economic Implications of Mandated Efficiency Standards for Household Appliances. *Energy Journal*, 1:21–29, 1980.
- E. Kriegler and T. Bruckner. Sensitivity analysis of emissions corridors for the 21st century. *Climatic Change*, 2002. Submitted.
- S. Kypreos and L. Barreto. A Simple Global Electricity MARKAL Model with Endogenous Learning. Villigen, Paul-Scherrer Institute, General Energy Research Department-ENE, Energy Modeling Group, 2000.
- S. Kypreos, L. Barreto, P. Capros, and S. Messner. A model prototype with endogenous technological change. *International Journal of Global Energy Issues*, 14: 374–397, 2000.
- M. Leimbach and T. Bruckner. Influence of economic constraints on the shape of emission corridors. *Computational Economics*, 18:173–191, 2001.
- A. Manne and R. Richels. *Buying Greenhouse Insurance. The Economic Costs of CO₂ Emission Limits*. MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- A. Maußner and R. Klump. *Wachstumstheorie*. Springer, Berlin, 1996.
- S. Messner. Endogenized Technological Learning in an Energy Systems Model. IIASA Working Paper WP-95-114, Laxenbrug, Austria, 1995.
- S. Moore, P. Freund, P. Riemer, and A. Smith. *Abatement of Methane Emissions*. International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, 1998. URL <http://www.ieagreen.org.uk/ch4rep.htm>.
- R.D. Morgenstern. Reducing Carbon Emissions and Limiting Costs. Prepared for the Aspen Institute’s Environmental Policy Forum, 2002.
- T. Nakamura. Capture and Sequestration of CO₂ from Stationary Combustion Systems by Photosynthesis of Microalgae. Presented at 1st National Conference on Carbon Capturing and Sequestration, Washington, D.C., 2001.
- N. Nakićenović and A. Grübler. Energy and the Protection of the Atmosphere. IIASA Working Paper RR-00-18, Laxenburg, Austria, 2000.

- N. Nakićenović, A. Gruebler, H. Ishitani, T.B. Johansson, G. Marland, J.R. Moreira, and H.H. Rogner. *Energy Primer*, pages 75–92. In: *Climate Change* (pp. 75-92), published for the International Panel on Climate Change by Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- N. Nakićenović and R. Swart. *Emissions Scenarios. Special Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- R. Nelson and S. Winter. *Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press, Cambridge, MA, 1982.
- W.D Nordhaus and J. Boyer. *Warming the World. Economic Models of Global Warming*. MIT Press, Cambridge, MA., 2000.
- B.C. O’Neill, F.L. MacKellar, and W. Lutz. *Population and Climate Change*, pages 113–139. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- J. E. Penner. Aerosols, their direct and indirect effects. In J. Houghton and Y. Ding, editors, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC, pages 289–348. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- G. Petschel-Held, H. J. Schellnhuber, T. Bruckner, F. L. Tóth, and K. Hasselmann. The tolerable windows approach: Theoretical and methodological foundations. *Climatic Change*, 41:303–331, 1999.
- M.E. Porter and C. van der Linde. Toward a new conception of the environmental Competitiveness. *Journal of Economic Perspectives*, 9:97–118, 1995.
- M. Prather and D. Ehhalt. Atmospheric chemistry and greenhouse gases. In J. Houghton and Y. Ding, editors, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC, pages 238–287. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- S. Rahmstorf and A. Ganopolski. Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model. *Climatic Change*, 43:353–367, 1999.
- R. Ramanathan. *Introduction to the Theory of Economic Growth*. Springer, Berlin, 1982.

- S. C. B. Raper, J. M. Gregory, and T. J. Osborn. Use of an upwelling-diffusion balance climate model to simulate and diagnose A/OGCM results. *Climate Dynamics*, 17:601–613, 2001.
- H.-H. Rogner. An Assessment of World Hydrocarbon Resources. *Annual Review of Energy and the Environment*, 22:217–262, 1997.
- V. Ruttan. *Technology, Growth and Development: An Induced Innovation Perspective*. Oxford University Press, Oxford, 2000.
- H. Saunders. The Macrodynamics of Energy Shocks. *Energy Economics*, 6:21–34, 1984.
- H. Saunders. The Khazzoom-Brookes Postulate and Neoclassical Growth. *Energy Journal*, 13:21–34, 1992.
- D. Schimel, D. Alves, I. Enting, M. Heimann, F. Joos, D. Raynaud, and T. M. L. Wigley. Radiative forcing of climate change - CO₂ and the carbon cycle. In J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, editors, *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the IPCC, pages 76–86. Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- F. Schmidt-Bleek. *Das MIPS Konzept. Weniger Naturverbrauch mehr Lebensqualität durch Faktor 10*. Dromer-Knauer, München, 1998.
- S.H. Schneider. Earth systems engineering and management. *Nature*, 409:417–421, 2001.
- M.F. Scott. *A New View of Economic Growth*. Oxford University Press, Oxford, 1989.
- J.L. Simon. *The ultimate resource 2*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1996.
- S. Smulders and M. de Nooij. *Induced Technological Change, Energy, and Endogenous Growth*. Tillburg University, 1999.
- N. Stehr. Die Natur ist nicht schuld. Die Welt am Sonntag, 26.11, 2000.

- N. Stehr and H. Dowlatabadi. Die Exekutive der Wissenschaften. FAZ, 3.4, 2001.
- S. H. Stevens, J. A. Kuuskraa, and D. Spector. CO₂ Sequestration in Deep Coal Seams: Pilot Results and Worldwide Potential. In *Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies Proceedings*, Cheltenham, 1998. IEA Greenhouse R&D Programme.
- M. Sugimori et al. Responses of Marine Biological Communities to Different Concentration of CO₂ in a Mesocosm Experiment. In *Greenhouse Gas Control Technologies 5 (GHGT-5) Proceedings*, pages 511–517, Cairns, 2000. Csiro.
- R. Sutherland. Energy Efficiency or the Efficient Use of Energy Resource. *Energy Sources*, 16:257–268, 1994.
- R. Sutherland. The Economics of Energy Conservation Policy. *Energy Policy*, 24: 361–370, 1996.
- F. L. Tóth, T. Bruckner, H. M. Füßel, M. Leimbach, G. Petschel-Held, and H. J. Schellnhuber. The tolerable windows approach to integrated assessments. In *Climate Change and Integrated Assessment Models - Bridging the gaps*, Proceedings of the IPCC Asia-Pacific Workshop on Integrated Assessments Models, pages 403–440, Ibaraki, 1997. Center for Global Environmental Research.
- B. van der Zwann, G. Gerlagh, G. Klaassen, and L. Schrattenholzer. Induced Technological Change in Climate Change Modelling. Mimeo D99-15, Amsterdam: Institute for Environmental Studies (IVM), 1999.
- E. von Weizsäcker, A. Lovins, and H. Lovins. *Factor four: doubling wealth - halving resource use*. Earthscan, London, 1997.
- I. G. Watterson. Interpretation of simulated global warming using a simple model. *Journal of Climate*, 13:202–215, 2000.
- WBGU. *Szenario zur Ableitung globaler CO₂-Reduktionsziele und Umsetzungsstrategien*. Stellungnahme zur ersten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Berlin 1995. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Bremerhaven, 1995.

World Energy Assessment Report. *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*. United Nations Development Programme, New York, 2000.