

Hans-Joachim Koch/Johannes Caspar (Hrsg.)

Klimaschutz im Recht



Nomos Verlagsgesellschaft
Baden-Baden

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Klimaschutz im Recht / Hans-Joachim Koch ; Johannes Caspar (Hrsg.). – 1. Aufl.
– Baden-Baden : Nomos Verl.-Ges., 1997
(Forum Umweltrecht ; Bd. 20)
ISBN 3-7890-4716-3

NE: Koch, Hans-Joachim [Hrsg.]; GT

1. Auflage 1997

© Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden 1997. Printed in Germany. Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen, der photomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung, vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
Prof. Dr. Klaus Hasselmann Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg Globale Erwärmung und optimierte Klimaschutzstrategien	9
Stud. iur. Roda Verheyen Fachbereich Rechtswissenschaft II, Universität Hamburg Der Beitrag des Völkerrechts zum Klimaschutz – Globale Aufgabe, globale Antworten?	29
Ass. iur. Kerstin Dittmann Wiss. Mitarb., Fachbereich Rechtswissenschaft II, Universität Hamburg Die Strategie der Europäischen Gemeinschaft	63
Moritz Reese Wiss. Mitarb., Fachbereich Rechtswissenschaft II, Universität Hamburg Die Handlungsempfehlungen der Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen	95
Stud. iur. Immo Graf Fachbereich Rechtswissenschaft II, Universität Hamburg Das Handlungskonzept der Bundesregierung	117
Senator Dr. Fritz Vahrenholt Präses der Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg Hamburgs Beitrag zum Klimaschutz	147
Jörn Pagels Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg Ein Klimaschutzgesetz für Hamburg	155
Prof. Dr. Hans-Joachim Koch, stud. iur. Claudia Behrend Fachbereich Rechtswissenschaft II, Universität Hamburg CO₂-Minderungspotentiale im Bereich der Industrie(anlagen) und das Instrumentarium des BImSchG	161

RiVG Klaus Thorwarth Verwaltungsgericht Hamburg CO₂-Minderungspotentiale im Wärmebedarf von Wohn- und Gewerbegebäuden und das Instrumentarium des Bau- und Immissionsschutzrechts	185
Ekkehard Hofmann, Rechtsreferendar, Hamburg Die verkehrspolitischen Strategien in der Bundesrepublik Deutschland und der Europäischen Union unter Berücksichtigung der Bekämpfung von verkehrsbedingten CO₂-Emissionen	221
Philipp Herrmann, Rechtsreferendar, Hamburg CO₂-Minderungspotentiale und rechtliche Ansatzpunkte für eine Verkehrsverlagerungs- und Verkehrsoptimierungsstrategie der Bundesrepublik Deutschland im Güterfernverkehr	249
Stud. iur. Constanze Mengel, stud. iur. Heiko Siebel Fachbereich Rechtswissenschaft II, Universität Hamburg Ziviler Flugverkehr und Klimaschutz	275
Moritz Reese Wiss. Mitarb., Fachbereich Rechtswissenschaft II, Universität Hamburg Raumplanungsrechtliche Instrumente zur Vermeidung und Verlagerung klimaschädlichen Regionalverkehrs	303
Dr. Michael Schäfer Rechtsanwalt, Hamburg Klimaschutz durch Kreislaufwirtschaft?	327
Dr. Ulrike Klocke Finanzbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg Eine CO₂-Abgabe als globale Handlungsstrategie	347
Dr. Johannes Caspar Wiss. Referent, Fachbereich Rechtswissenschaft II, Universität Hamburg Klimaschutz und Verfassungsrecht	367
Stichwortverzeichnis	391

Globale Erwärmung und optimierte Klimaschutzstrategien

A. Vorhersagen zur globalen Erwärmung	9
B. Strategien zum Klimaschutz	13
C. Die Optimierungsaufgabe	15
I. Einige Vorbemerkungen	15
II. Mathematische Formulierung	16
D. Ergebnisse	21
E. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	24

A. Vorhersagen zur globalen Erwärmung

Seit Beginn der industriellen Revolution vor etwa 200 Jahren ist der Verbrauch von fossilen Brennstoffen – zuerst Kohle, später Öl und Gas – ständig gestiegen. Schon vor hundert Jahren machte Arrhenius (1896) auf die Möglichkeit der globalen Erwärmung infolge der Treibhauswirkung des bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzten Kohlendioxids (CO_2) aufmerksam. Heute übertrifft der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre mit einer Konzentration von 360 ppm (parts per million) bereits den vorindustriellen Wert von 280 ppm um 29 % (Bild 1).

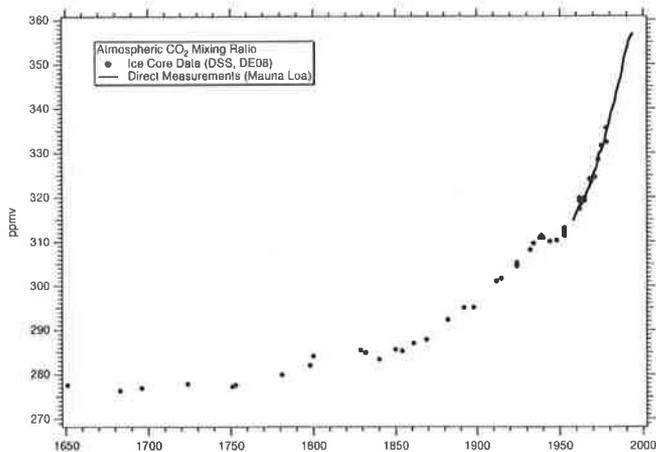


Bild 1 Gemessener Anstieg der CO_2 -Konzentration der Atmosphäre seit Beginn der industriellen Revolution. Daten seit 1957 sind auf Mauna Loa und an anderen Meßstationen direkt gemessen, frühere Daten wurden aus dem CO_2 -Gehalt von Luftbläschen in Eisbohrkernen ermittelt.

Bei weiterhin ungebremstem Wachstum der Emissionen wird die CO_2 -Konzentration in der zweiten Hälfte des nächsten Jahrhunderts das Doppelte des vorindustriellen Wertes erreichen. Die Konzentrationen weiterer treibhauswirksamer Gase sind infolge der zunehmenden technischen Entwicklung und des Bevölkerungswachstums ebenfalls gestiegen (Bilder 2 und 3). Hierzu gehören insbesondere Methan (infolge von Rinderhaltung, Reisanbau und Erdgasgewinnung), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW, in der Natur nicht vorkommende, rein anthropogene Gase) und Lachgas (N_2O , in erster Linie aus landwirtschaftlicher Düngung). Nach Modellrechnungen hat die Zunahme aller Treibhausgase bis heute zu einem Temperaturanstieg von etwa $0,5^\circ\text{C}$ - $1,0^\circ\text{C}$ geführt. Hierbei ist auch der Einfluß der erhöhten Konzentration von Sulfataerosolen berücksichtigt, die durch die Emission von SO_2 , vorwiegend aus Kraftwerken, entstehen und durch verstärkte Reflexion der Sonnenstrahlung der Treibhauserwärmung entgegenwirken.

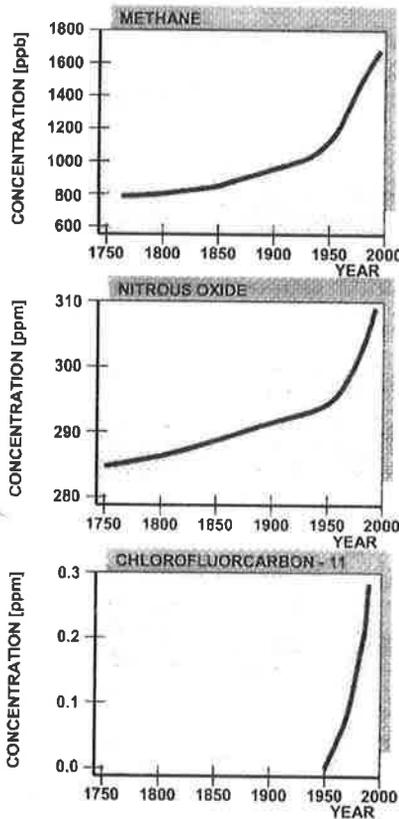


Bild 2 Gemessene Zunahme der Treibhausgase Methan, Lachgas und FCKW

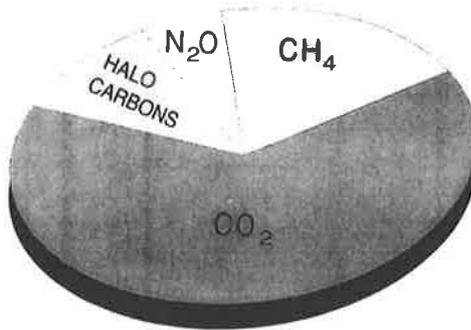


Bild 3 Relative Anteile der verschiedenen Treibhausgase zum zusätzlichen Treibhauseffekt seit Beginn der Industrialisierung

Eine Temperaturerhöhung in dieser Größenordnung stellt noch keine gravierende Klimaänderung dar. Sie ist noch nicht wesentlich größer als die mittelfristige natürliche Variabilität des Klimas und kann daher nur mit einer gewissen statistischen Wahrscheinlichkeit, aber nicht mit Sicherheit, in den beobachteten Temperaturen nachgewiesen werden (IPCC, 1996; Hegerl et al., 1996a, b). Das Problem der globalen Erwärmung liegt im wesentlich höheren Temperaturanstieg, der nach Modellhochrechnungen im nächsten Jahrhundert bei ungebremsster Zunahme der Treibhausgasemissionen zu erwarten ist. Simulationen mit Kohlenstoffkreislaufmodellen und gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen sagen bei einem weiteren Anstieg der bisherigen CO₂-Emissionen von etwa 6 GtC/Jahr auf etwa 20 GtC/Jahr bis Ende des nächsten Jahrhunderts eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur von etwa 3° C voraus (IPCC 1990, 1992, 1995; Cubasch et al., 1992; Bilder 4 und 5). Bei weiterhin unreguliertem hohen Stand der CO₂-Emissionen auch in den folgenden Jahrhunderten könnte die Temperatur sogar noch auf das Doppelte dieses Wertes ansteigen und würde dann sogar die Erwärmung seit der letzten Eiszeit übertreffen. Im Gegensatz zu dieser, die über mehrere tausend Jahre ablief, wird sich die anthropogene globale Erwärmung aber innerhalb von 100-200 Jahren einstellen. Eine Klimaänderung in dieser Größenordnung und Geschwindigkeit hat die Menschheit bisher noch nicht erlebt, und die Auswirkung auf die Umwelt, Wirtschaft und allgemeine Lebensbedingungen des Menschen sind heute nicht absehbar.

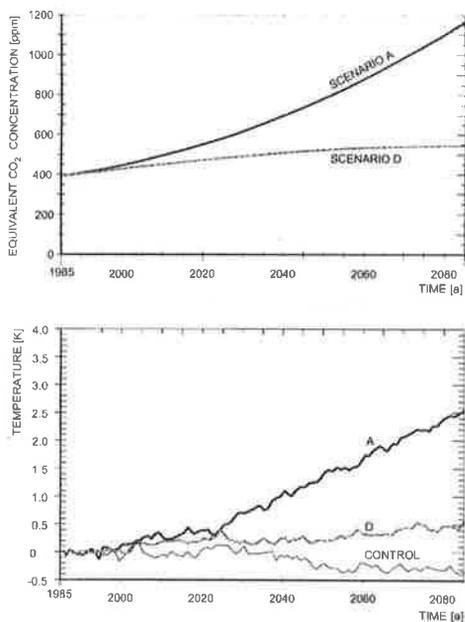


Bild 4 Hochrechnungen der CO₂-Konzentration (oben) und der global gemittelten Temperatur an der Erdoberfläche (unten) für das IPCC-Szenarium A (nach Cubasch et al., 1992).

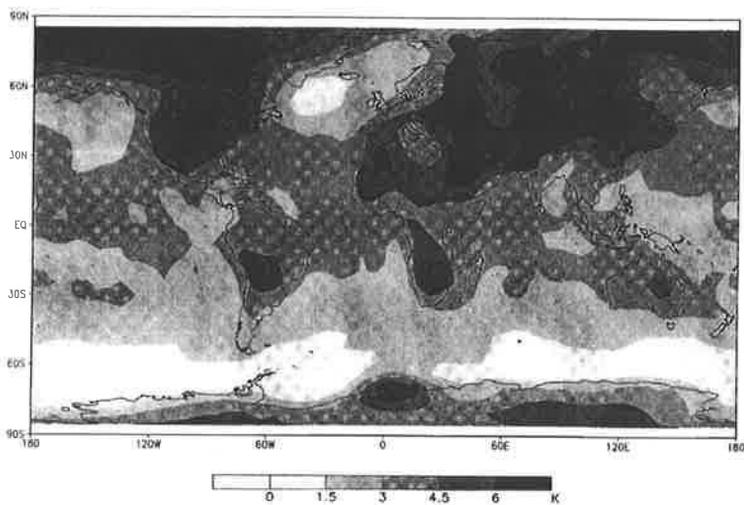


Bild 5 Verteilung der Erdoberflächentemperatur im Jahre 2080 bei einer CO₂-Zunahme nach Szenarium A (nach Cubasch et al., 1995).

Wegen der Land-See-Verteilung ist die prognostizierte Erwärmung inhomogen; sie ist stärker über den Kontinenten und am niedrigsten über dem Meer, wo die große Wärmekapazität der Ozeane die Erwärmung stark dämpft (Bild 5). Ferner nimmt die Erwärmung wegen der Wechselwirkung mit dem Meereis nach hohen Breiten hin zu. Neben der Temperaturänderung sagen die gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodelle auch Änderungen des Niederschlages, der Sturmbahnen, der Häufigkeit von Dürren u.s.w. sowie einen Anstieg des Meeresspiegels (etwa 0,2 - 0,7 m bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts) voraus. Allerdings sind diese regional stark unterschiedlichen Änderungen mit den bisher noch relativ grob auflösenden Modellen (bei einer Gittermaschenweite von etwa 300-500 km) noch nicht zuverlässig zu ermitteln. So ist die in den Medien häufig vorausgesagte Zunahme der Sturmhäufigkeiten keineswegs im globalen Mittel durch Modelle belegt, obwohl lokale Veränderungen in den Sturmhäufigkeiten sicherlich zu erwarten sind. Auch der erwähnte statistische Nachweis einer Änderung des Klimas durch den Menschen konnte bisher lediglich anhand der globalen Verteilungen der Temperaturänderungen in den letzten Dekaden erbracht werden und nicht in bezug auf eine statistisch noch nicht sicher belegbare Änderung der Sturmhäufigkeiten.

B. Strategien zum Klimaschutz

Vor dem Hintergrund dieser Prognosen stellt die Entwicklung und Implementierung einer international abgestimmten Strategie zum Schutz des Klimas eine vordringliche Aufgabe der aktuellen Politik dar. Im folgenden sollen einige Überlegungen zur Erarbeitung optimierter Steuerungsmaßnahmen zur Minimierung der Auswirkung der Klimaänderung entwickelt werden. Eine sinnvolle Optimierungsaufgabe kann aber bisher nur für CO₂-Emissionen formuliert werden, die allerdings den größten Beitrag (60 %) zum anthropogenen Treibhauseffekt liefern. Bis auf FCKWs, deren Herstellung durch das Montreal-Abkommen und spätere verschärfte Vereinbarungen weitgehend unterbunden werden konnte, liegen für die übrigen Treibhausgase keine sicheren Angaben über Quellen und Senken oder konkrete Vorstellungen zur Steuerung der Konzentration vor. Bei den Abschätzungen der wirtschaftlichen, ökologischen und anderen Schäden durch Klimaänderungen, die in eine optimierte Kosten-Nutzen-Analyse Eingang finden müssen, muß ferner berücksichtigt werden, daß die entscheidenden regionalen Klimaänderungen, die sich am stärksten in der Ermittlung der Klimafolgekosten niederschlagen, zur Zeit noch sehr unsicher berechenbar sind.

Die folgenden Untersuchungen zur Optimierung der Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung sowohl der Vermeidungskosten als auch der Klimaschadenskosten können daher nur die qualitativen Zusammenhänge beleuchten. Dennoch lassen sich einige grundsätzliche Folgerungen aus solchen Optimierungsuntersuchungen ableiten, die allgemein Gültigkeit haben sollten, unabhängig von den Einzelheiten der angenommenen Kostenausdrücke.

Nach den vorliegenden Modellrechnungen sind gravierende Klimaänderungen langfristig nur zu vermeiden, wenn die Emissionen von CO₂ auf einen Bruchteil der heutigen Werte heruntergefahren werden. Die Rechnungen zeigen aber auch, daß wegen der Trägheit des Klimasystems eine sofortige Reduktion der Emissionen nicht erforderlich ist. Sie kann vielmehr ohne wirtschaftliche Dislokationen im Laufe von mehreren Jahrzehnten oder sogar einem Jahrhundert durch einen allmählichen Wechsel zu regenerativen Energietechnologien erfolgen (Hasselmann et al., 1996a, b).

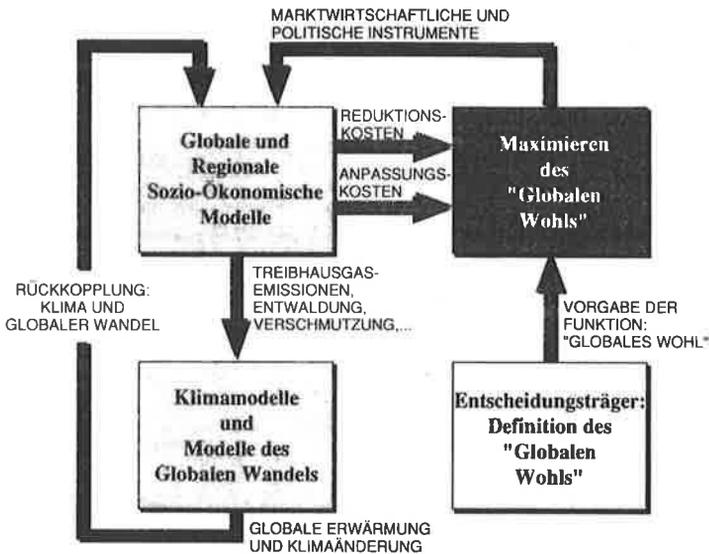


Bild 6 Subsysteme und Wechselwirkungen eines „Global Environment and Society“ (GES)-Modells (nach Hasselmann, 1991).

Die zweckmäßigste Strategie zur Steuerung der Treibhausgasemissionen läßt sich als eine dynamische Optimierungsaufgabe formulieren. Hierzu muß sowohl die Dynamik des Klimasystems als auch die Reaktion des Wirtschaftssystems auf Klimaänderungen und auf externe Steuerungseingriffe in einem integrierten Modell des gekoppelten Klima-sozio-ökonomischen Systems dargestellt werden.

Die allgemeine Struktur eines solchen „Global Environment and Society“ (GES)-Modells für sogenannte „integrated assessment“-Studien ist in Bild 6 schematisch dargestellt. Neben den Modulen des Klimasystems und des sozio-ökonomischen Systems mitsamt ihren gegenseitigen Wechselwirkungen (linke Seite) enthält das Modell ein „Verhandlungsmodul“ (decision makers module, unten rechts), das die Handlungsabläufe bei der Erarbeitung einer international abgestimmten Klimaschutzpolitik simuliert. Im GES-System des Bildes 6 wird das Er-

gebnis dieser Verhandlung durch ein weiteres Modell, die „Weltwohlfahrtsfunktion“ (oben rechts), dargestellt. Ziel der internationalen Klimaschutzstrategie ist nach diesem Schema die kooperative Maximierung dieses gemeinsam festgelegten „globalen Wohls“ durch entsprechend abgestimmte Steuerungsmaßnahmen aller beteiligten Akteure.

Voraussetzung dieser idealisierten Darstellung ist allerdings, daß durch internationale Verhandlungen die unterschiedlichen Zielvorstellungen der einzelnen Verhandlungsteilnehmer in der Definition einer für alle Akteure verbindlichen globalen Wohlfahrtsfunktion erfolgreich abgestimmt werden können. Das spieltheoretische Problem, wie diese Einigung zustande kommt, oder – falls keine Einigung erzielt wird – welche Emissionsstrategien die einzelnen Verhandlungsteilnehmer dann unabhängig voneinander verfolgen (Hasselmann und Hasselmann, 1996), soll hier nicht untersucht werden. Das Klimaschutzproblem wird vielmehr vereinfacht als eine globale Optimierungsaufgabe aufgefaßt, bei der nur ein einziger Entscheidungsträger als Vertreter aller Interessengruppen eine globale Steuerung der summierten Gesamtemissionen unternimmt.

Wir betrachten im folgenden auch nicht die unterschiedlichen Instrumente zur Steuerung der CO₂-Emission (CO₂-Abgabesteuer, Emissionszertifikate usw.), sondern es wird angenommen, daß der Entscheidungsträger die Emission unmittelbar festsetzen kann. Es werden somit die optimalen Emissionspfade zur Maximierung der integrierten Weltwohlfahrt untersucht, ohne auf die Frage der Steuerungsinstrumente zur Realisierung dieser Emissionspfade näher einzugehen. Allerdings kommen wir zum Schluß auf einige Implikationen unserer Ergebnisse für die politische Realisierung einer effektiven Langzeit-Klimaschutzstrategie zurück.

C. Die Optimierungsaufgabe

I. Einige Vorbemerkungen

Sowohl Klimaänderungen als auch Maßnahmen zur Vermeidung von Klimaänderungen verursachen Kosten. Der Begriff „Kosten“ wird hierbei allgemein aufgefaßt nicht nur als unmittelbare wirtschaftliche Kosten, sondern als jede Form von Schaden oder Beeinträchtigung der Lebensqualität im Sinne einer Reduktion der „Wohlfahrt“. Die Aufgabe einer optimierten Klimaschutzstrategie, die Wohlfahrt zu maximieren, ist somit gleichbedeutend mit der Aufgabe, die Summe der Klimaschäden- und Vermeidungskosten, integriert über alle Zeiten von der Gegenwart in die Zukunft, zu minimalisieren. Bei vorgegebenen Kostenfunktionen stellt die Minimierung ein wohldefiniertes mathematisches Problem der Optimierung dar (Tahvonen et al., 1994). Das Problem wirft dennoch eine Reihe von grundsätzlichen Fragen auf, auf die später eingegangen wird, die aber hier zunächst vorweg gestellt werden sollen:

- (1) Sowohl die Auswirkung einer Klimaänderung als auch die Aufwendungen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen sind kostenmäßig nur schwer abzu-

schätzen. Im folgenden werden daher stark vereinfachte Ausdrücke für beide Kostenanteile angenommen.

- (2) Um die Gesamtkosten, aufsummiert über alle Zeiten, zu ermitteln, müssen zukünftige Kosten in Relation zu heutigen Kosten festgelegt werden. Die Form dieser intertemporalen Relation hat starken Einfluß auf die berechneten optimalen Emissionspfade, ist aber wissenschaftlich stark umstritten. Klassische Ökonomen schreiben gern sämtliche Kosten mit einem universellen exponentiellen Diskontierungsfaktor ab, in Anlehnung an übliche Wirtschaftlichkeitsrechnungen für ökonomische kurz- und mittelfristige Investitionen. Ökologen hingegen argumentieren, dies sei zwar für Vermeidungskosten angemessen, bedeutet aber für Klimaschäden eine unzulässige Abwertung der langfristigen Schäden zukünftiger Klimaänderungen: Die üblichen ökonomischen Abschreibungsraten entsprechen nicht der intertemporalen Wertzuteilung, die die Öffentlichkeit einer langfristigen Erhaltung der Umwelt zumißt. Die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen über die intertemporalen Kostenrelationen für Klimaschäden und Vermeidungsaufwendungen werden später durch entsprechende Sensitivitätsrechnungen verdeutlicht.
- (3) Zur mathematischen Lösung der Optimierungsaufgabe werden relativ einfache sozio-ökonomische und Klimamodelle benötigt, die eine iterative numerische Anpassung der Emissionskurven an den optimalen Pfad ermöglichen. Globale Klimamodelle, die für Klimahochrechnungen üblicherweise verwendet werden, sind für solche iterativen Optimierungsverfahren viel zu aufwendig. Es müssen vereinfachte, weniger rechenaufwendige Klimamodelle entwickelt werden. Wir werden im folgenden zu diesem Zweck sogenannte linearisierte „impulse response“-Klimamodelle einführen, die anhand komplexer Klimamodelle kalibriert wurden.
- (4) Wegen der großen Speicherkapazität des Ozeans für Wärme und CO_2 und der Langlebigkeit von Treibhausgasen wie CO_2 oder FCKWs zeichnet sich das Klimasystem durch eine große Trägheit aus. In die Atmosphäre eingebrachte Treibhausgase können das Klima über mehrere hundert Jahre verändern. Eine optimierte Emissionsstrategie muß daher über sehr lange Zeitspannen angelegt werden, weit jenseits aller realistischen ökonomischen, politischen und technologischen Planungshorizonte. Die rechnerisch ermittelten optimalen Emissionspfade können somit nur als theoretische Anhaltspunkte angesehen werden, die ständig an die sich verändernde technologische und ökonomische Entwicklung angepaßt werden müssen.

II. Mathematische Formulierung

Nach diesen Vorbemerkungen wenden wir uns nun der formalen Optimierungsaufgabe zu. Gesucht wird der optimale CO_2 -Emissionspfad $e(t)$, der im oben beschriebenen Sinne die Gesamtkosten

$$C = \sum_t [c_a(t) + c_d(t)] \quad (1)$$

summiert über die jeweils jährlich anfallenden Vermeidungskosten $c_a(t)$ („abatement costs“) und Klimaschadenskosten $c_d(t)$ („damage costs“), minimiert. Die Zeitvariable t wird hierbei als diskrete Variable in Inkrementen von einem Jahr angegeben (wir benutzen hier die in den Wirtschaftswissenschaften gebräuchlichere diskrete Schreibweise statt der in der Klimaforschung üblichen Integraldarstellung).

Da über die Formen von c_a und c_d wenig bekannt ist, setzen wir hierfür möglichst strukturell transparente Formen an, die die wichtigsten Eigenschaften der zu erwartenden Kosten widerspiegeln:

$$c_a = \left[\left(r - \frac{1}{r} \right)^2 + \tau_1^2 \dot{r}^2 + \tau_2^4 \dot{r}^2 \right] e^{-t/\tau_a} \quad (2)$$

$$c_d = \left[\left(\frac{T}{T_c} \right)^2 + \left(\frac{\dot{T}}{\dot{T}_c} \right)^2 \right] e^{-t/\tau_d} \quad (3)$$

wobei

$r = e/e_A =$ Emissionsreduktionsfaktor,

$eA(t) =$ „business-as-usual“ (BAU) Emissionspfad (wirtschaftlich optimaler Emissionspfad ohne Berücksichtigung der Klimafolgekosten).

$\dot{r}(t) = \frac{1}{2} [r(t+1) - r(t-1)] =$ Änderungsrate von r ,

$\ddot{r}(t) = \frac{1}{2} [\dot{r}(t+1) - \dot{r}(t-1)] = \frac{1}{4} [r(t+1) - 2r(t) + r(t-1)]$

$=$ Änderungsrate von \dot{r} ,

$T(t) =$ Änderung der global gemittelten Temperatur,

$\dot{T} = \frac{1}{2} [T(t+1) - T(t-1)] =$ Änderungsrate von T ,

und $\tau_a, \tau_d, \tau_1, \tau_2, T_c, \dot{T}_c$ konstante Parameter darstellen.

Der erste Term auf der rechten Seite von (2) beschreibt die zusätzlichen wirtschaftlichen Kosten, die bei einer (positiven oder negativen) Abweichung ($r \neq 1$) von dem

vorgegebenen business-as-usual Emissionspfad $e_A(t)$ entstehen. Die beiden folgenden Terme stellen eine einfache Parametrisierung der Trägheit des Wirtschaftssystems dar; sie geben die Anpassungskosten wieder, die durch eine zu rasche Abweichung vom BAU-Pfad verursacht werden.

Die Klimaänderung wird in Gleichung (3) durch eine einzige Größe dargestellt, die global gemittelte Temperatur $T(t)$. Für eine genauere Kostenanalyse müßten mehrere geographisch und jahreszeitlich abhängige Klimafaktoren berücksichtigt werden, z.B. Niederschlag, Bodenfeuchte, Wolkenbedeckung und Meeresspiegel. Für die folgenden grundsätzlichen Überlegungen genügt es aber, diese weiteren Klimafaktoren durch eine einzige repräsentative Klimavariablen zu ersetzen.

Die intertemporalen Kostenrelationen werden in Gleichungen (2) und (3) durch exponentielle Abschreibungsfaktoren dargestellt. Wichtig für die späteren Ergebnisse ist die Berücksichtigung unterschiedlicher Diskontierungszeitkonstanten τ_a bzw. τ_d (inverse jährliche Diskontierungsraten) für die Vermeidungs- bzw. Klimaschadenskosten.

Für die Berechnung des optimalen Pfades $e(t)$ sind die absoluten Größen der Vermeidungs- und Klimaschadenskosten irrelevant, es kommt nur auf das Verhältnis der Kosten an. Diese Freiheit der Normierung wurde genutzt, um eine mögliche freie Konstante vor dem ersten Term der Vermeidungskosten in Gleichung (2) wegzulassen. In absoluten Größen liegen die jährlichen Gesamtkosten nach verschiedenen Schätzungen im Bereich weniger Prozent des Brutto sozialprodukts.

Der recht einfache Ansatz (2) für die Vermeidungskosten sollte für eine genauere Analyse durch ein makroökonomisches Modell ersetzt werden. Entsprechende Modelle sind in mehreren Kosten/Nutzen-Analysen eingesetzt worden (siehe z.B. Nordhaus, 1991, 1993; Cline, 1992, oder die gute Übersichtsdarstellung von Fankhauser, 1995). Die Ergebnisse dieser Analysen differieren jedoch sehr stark. Um die Ursachen dieser Diskrepanzen besser zu beleuchten, wird daher bewußt die stark vereinfachte, dafür aber strukturell transparente Form (2) für die Vermeidungskosten angenommen (Hasselmann et al., 1996).

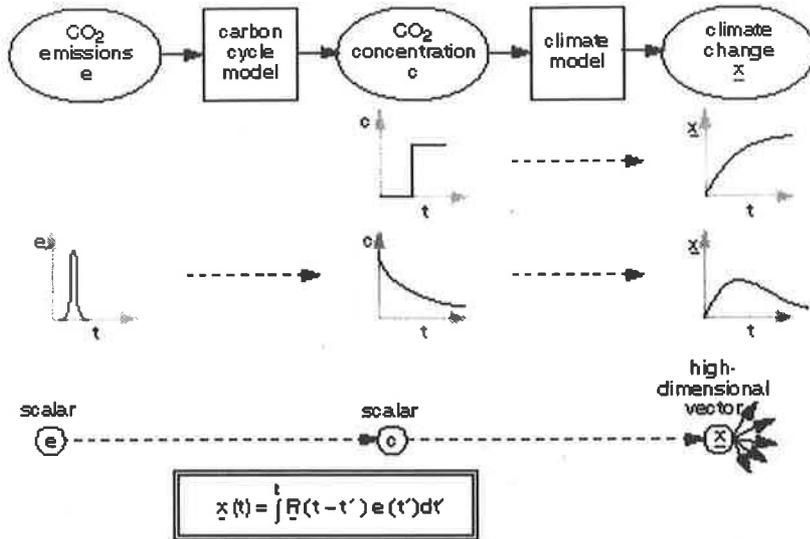


Bild 7 Struktur eines linearisierten „impulse response“-Klimamodells für kleine Klimaänderungen. Der Klimazustandsvektor x besitzt die gleiche Anzahl Freiheitsgrade wie das vollständige nichtlineare Klimamodell, das zur Kalibrierung verwendet wird. Das hier dargestellte Modell besteht aus zwei nacheinander geschalteten Modellen: einem Kohlenstoffkreislaufmodell und einem gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modell.

Zur Schließung des Problems wird noch ein Klimamodell benötigt, um die Änderung der globalen Temperatur $T(t)$ als Funktion der Emission $e(t)$ zu bestimmen. Wir verwenden hierfür ein vereinfachtes, linearisiertes sogenanntes „impulse response“-Modell nach dem allgemeinen Ansatz (siehe Bild 7)

$$x(t) = \sum_{t' < t} e(t') R_x(t - t') dt'. \quad (4)$$

Hierbei stellt x die Änderung einer beliebigen Klimagröße dar (in unserem Falle die globale Mitteltemperatur T), während die Antwortfunktion („response function“) $R_x(t - t')$ die Änderung der Klimagröße wiedergibt, die ein im Jahre t' eingebrachter Einheits-Emissionseintrag im Jahre $t (> t')$ verursacht. Die linearisierte Form (4) gilt allgemein für jede hinreichend kleine Störung eines beliebigen nicht-linearen Systems. Beim Klimasystem ist die Linearisierung bei Änderungen der globalen Mitteltemperatur bis zu etwa 3°C zulässig.

Die Responsfunktionen R_x lassen sich anhand von numerischen Simulationen mit aufwendigen, voll nichtlinearen Kohlenstoffkreislauf- und Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen kalibrieren (Maier-Reimer und Hasselmann, 1987; Maier-Reimer, 1993; Hasselmann et al., 1993). Bild 8 zeigt die auf diese Weise ermittelte Responsfunktion R' für die globale Mitteltemperatur. Sie setzt sich zusammen aus der Antwort R_w des Kohlenstoffkreislaufmodells und der Antwort R'_y des gekoppelten

Ozean-Atmosphäre-Modells (siehe auch Bild 7). Man beachte das lange Gedächtnis des Klimasystems. Details sind in Hasselmann et al. (1996) wiedergegeben.

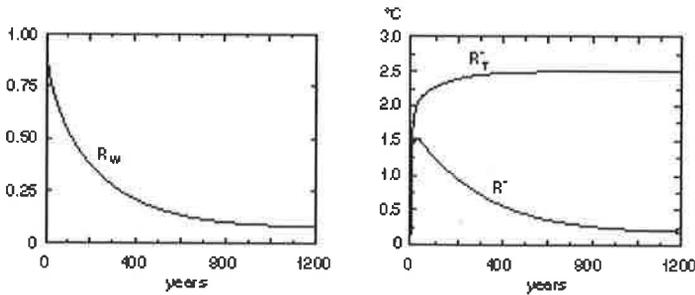


Bild 8 Links: Antwortfunktion R_w für das Kohlenstoffkreislaufmodell; R_w beschreibt die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre nach einer Einheitsinjektion von CO_2 in die Atmosphäre zum Zeitpunkt $t = 0$. Rechts, obere Kurve: Antwort R_T^+ der globalen Mitteltemperaturen des gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Systems auf eine plötzliche, anschließend konstant gehaltene Verdoppelung der CO_2 -Konzentration der Atmosphäre zum Zeitpunkt $t = 0$. Rechts, untere Kurve: Temperaturantwort R^- des Gesamtsystems auf eine plötzliche Verdoppelung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration zum Zeitpunkt $t = 0$, unter Berücksichtigung des anschließenden Abfalles R_w der CO_2 -Konzentration durch Aufnahme des CO_2 im Ozean (nach Hasselmann et al., 1996).

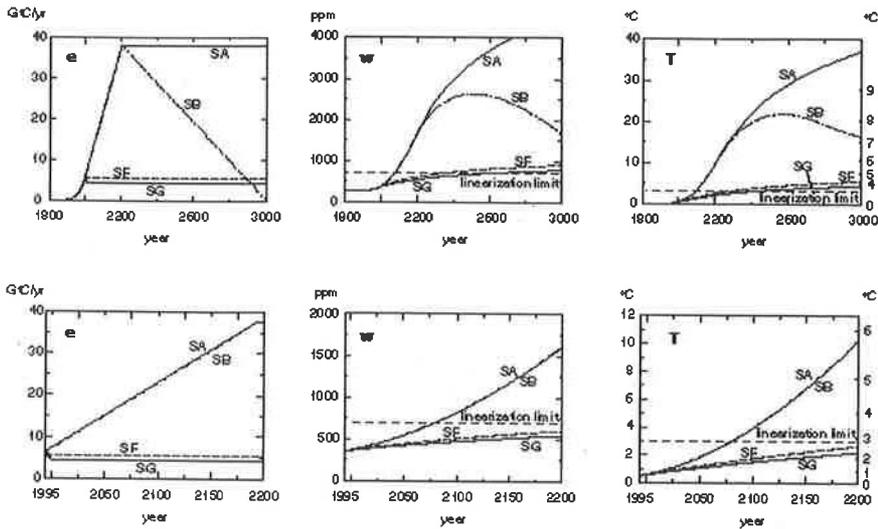


Bild 9 Von links nach rechts: Emissionen e , CO_2 -Konzentrationen w und globale Mitteltemperaturen T für verschiedene Emissionsszenarien. Das linearisierte impulse-response-Modell ist nur unterhalb der horizontalen gestrichelten Linie gültig. Die rechte Ordinatenachse des Bildes rechts gilt für die geschätzten Temperaturen nach Berücksichtigung der nichtlinearen logarithmischen Beziehung zwischen der CO_2 -Konzentration und der erhöhten Treibhausrückstrahlung. Die unteren Bilder zeigen den verkürzten Zeitabschnitt 1995-2200, in dem die wesentlich größeren späteren Klimaänderungen nicht aufgezeigt sind (nach Hasselmann et al., 1996).

D. Ergebnisse

Um den Einfluß der Optimierung besser einordnen zu können, zeigt Bild 9 zunächst die Zunahme der CO_2 -Konzentration und der globalen Temperatur für verschiedene Szenarien bei vorgegebenen CO_2 -Emissionen, d.h. ohne Optimierung der Emissionspfade. Im BAU (business-as-usual) Szenarium SA, das als Referenz für die Vermeidungskosten in den späteren Optimierungsläufen verwendet wird (siehe Gleichung (2)), steigen die Emissionen bis zum Jahre 2200 linear auf einen Wert von 38 GtC/a (Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr) an und werden dann auf diesem Wert eingefroren. Sowohl das Szenarium SA als auch das modifizierte Szenarium SB, mit langsam linear abfallenden Emissionen nach dem Jahre 2200, ergeben extrem hohe Temperaturanstiege nach einigen Jahrhunderten. Während die oberen Bilder den vollständigen Klimaverlauf vom vorindustriellen Jahr 1800 bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts wiedergeben, zeigen die unteren Bilder den Verlauf für den kürzeren Zeitabschnitt 1995-2200. Man erkennt, daß die häufig im Mittelpunkt stehende politische Diskussion um die Klimaänderungen des nächsten

Jahrhunderts oder sogar nur der nächsten Dekaden zu einer gefährlichen Blickverkürzung gegenüber den wesentlich gravierenderen Langzeitklimaänderungen führen kann.

Ebenfalls in Bild 9 aufgeführt sind die entsprechenden Ergebnisse beim Einfrieren der Emission ab dem Jahre 2000 auf den Wert vom Jahre 1990 (SF) bzw. auf den um 20 % reduzierten Wert (SG). Obwohl sich die Temperaturänderungen bei diesen Szenarien in den nächsten 200 Jahren in tolerierbaren Grenzen halten, führen auch diese Szenarien langfristig zu kaum akzeptierbaren Erwärmungen.

Im Gegensatz zu den gravierenden Klimaänderungen der BAU-Szenarien zeigt Bild 10 die deutlich reduzierten CO₂-Emissions- und Konzentrationspfade mit den dazugehörigen Temperaturverläufen für ein optimiertes Emissionsszenarium SO, mit den Parameterwerten $\tau_1 = \tau_2 = 100$ Jahre, $\tau_a = 50$ Jahre, $\tau_d = \infty$, $T_c = 1^\circ\text{C}$, $T_c = 0.02^\circ\text{C/a}$. Zum Vergleich sind weiterhin zwei optimierte Szenarien S1a, S1b wiedergegeben, die sich vom Standardszenarium SO nur durch eine reduzierte bzw. verschwindende wirtschaftliche Trägheit unterscheiden: $\tau_1 = \tau_2 = 50$ Jahre für den Lauf S1a und $\tau_1 = \tau_2 = 0$ für den Lauf S1b. Bei allen Lösungen müssen die CO₂-Emissionen im Verlauf von 200 bis

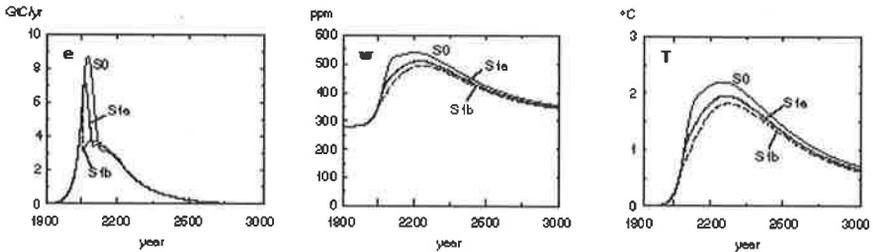


Bild 10 Optimierte Emissionspfade und Klimaänderungen mit dazugehörigen Vermeidungs- und Klimaschadenskosten, für den Standardlauf SO, charakterisiert durch ausgeprägte wirtschaftliche Trägheit ($\tau_1 = \tau_2 = 100$ Jahre), sowie für die Läufe S1a mit reduzierter Trägheit ($\tau_1 = \tau_2 = 50$ Jahre) und S1b ohne Trägheit ($\tau_1 = \tau_2 = 0$). Trotz starker Unterschiede in den Emissionen zum Anfang des nächsten Jahrhunderts ergeben sich wenig Unterschiede in der langfristigen Klimaentwicklung (nach Hasselmann et al., 1996).

300 Jahren auf einen Bruchteil des heutigen Wertes heruntergefahren werden, um eine langfristige globale Erwärmung zu vermeiden. Eine Verringerung oder sogar Ausschaltung der wirtschaftlichen Trägheit im Modell reduziert bzw. vermeidet das weitere kurzfristige Ansteigen der Emissionen in den nächsten Jahren, hat aber keinen nennenswerten Einfluß auf die Langzeitentwicklung des Klimas. Der erforderliche langfristige Übergang zu stark reduzierter Emission kann vielmehr nach diesen optimierten Pfaden als langsamer technologischer Umstellungsprozeß realisiert werden, wobei sogar vorübergehend weiter ansteigende Emissionen verkräftet werden können.

Diese Ergebnisse sind allerdings stark von der Wahl der Abschreibungsraten abhängig. Bild 11 zeigt die entsprechenden Resultate, wenn an Stelle einer ver-

schwindenden Abschreibungsrate für die Klimaschäden (unendliche Abschreibungszeitkonstante, $\tau_d = \infty$) endliche Zeitkonstanten $\tau_d = 100$ Jahre (Lauf S4a), $\tau_d = 50$ Jahre (S4b), $\tau_d = 35$ Jahre (S4c) und $\tau_d = 25$ Jahre (S4d) angenommen werden. Mit zunehmender

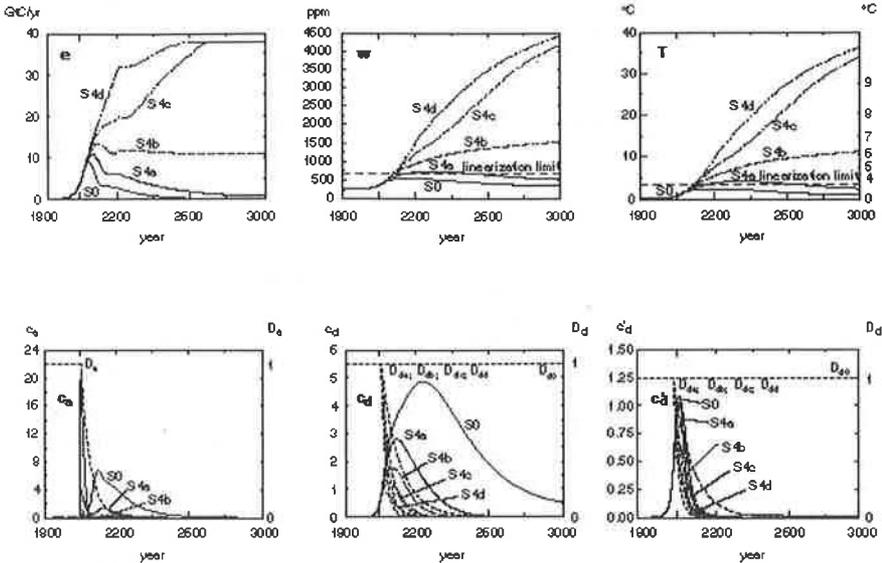


Bild 11 Einfluß der Abschreibungsrate (inverse Abschreibungszeitkonstante τ_d) für Klimaschadenskosten auf die optimierten Lösungen. Standardlauf S0: keine Abschreibung, $\tau_d = \infty$; Läufe S4a, b, c, d: $\tau_d = 100, 50, 35$ bzw. 25 Jahre (nach Hasselmann et al., 1996).

Abschreibungsrate nimmt die globale Erwärmung stark zu. Dies ist insofern nicht überraschend, als bei entsprechender Abschreibung die langfristigen Klimaschäden nach einigen hundert Jahren nicht mehr in der Kostenrechnung zu Buche schlagen. Bei gleichen Abschreibungsraten für Vermeidungs- und Klimaschadenskosten ($\tau_a = \tau_d = 50$ Jahre, Lauf S4b) klingen die Emissionen nicht mehr für kleine Werte für große Zeiten ab, und wenn die Abschreibungsrate für Klimaschäden die Abschreibungsrate für Vermeidungskosten sogar noch übertrifft (Läufe S4c, S4d), nähern sich die optimierten Emissionslösungen asymptotisch dem BAU-Referenzfall $e_A(t)$, mit entsprechend starken langfristigen Klimaänderungen. Eine Klimaentwicklung, die das Prinzip der Nachhaltigkeit über mehrere Jahrhunderte erfüllt, erhält man als Lösung der Optimierungsrechnung nur, wenn an Stelle der üblichen wirtschaftlichen Abschreibungsrate realistische intertemporale Kostenrelationen für die Klimaschäden angesetzt werden, die den heutigen Stellenwert eines langfristigen Erhalts des Klimas angemessen zum Ausdruck bringen.

E. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Ziel dieser Untersuchungen war nicht die Aufstellung konkreter Kostenrechnungen für optimierte CO₂-Emissionspfade als Grundlage für detaillierte politische Entscheidungen, sondern vielmehr die Verdeutlichung der zeitabhängigen Wechselbeziehungen zwischen Treibhausgasemissionen und Klimaänderungen. Aus den allgemeinen Eigenschaften der optimierten Emissionspfade und den sich daraus ergebenden Klimaänderungen sollte ferner der Einfluß der intertemporalen Kostenrelationen (sowie anderer, in komplexeren Kosten-Nutzen-Analysen häufig verborgenen Modellannahmen) auf die berechneten optimalen Klimaschutzstrategien klar gestellt werden. Aus unseren Ergebnissen lassen sich folgende allgemeine Schlußfolgerungen ziehen:

- Wegen der langen Verweilzeit von CO₂ in der Atmosphäre und der großen thermischen Trägheit des Klimasystems bewirken CO₂-Emissionen Klimaänderungen, die über mehrere Jahrhunderte anhalten und bei unverminderten Emissionen kumulativ zunehmen. Eine wirksame Klimaschutzstrategie mit dem Anspruch der Nachhaltigkeit muß daher für extrem lange Zeithorizonte, weit jenseits der üblichen Zeitspannen wirtschaftlicher oder politischer Planungen, konzipiert werden.
- Langfristig läßt sich eine gravierende Klimaänderung nur vermeiden, wenn die globalen CO₂-Emissionen auf einen Bruchteil der heutigen Werte heruntergefahren werden. Allerdings kann diese Reduktion als langsamer technologischer Umstellungsprozeß über mehrere Jahrzehnte, sogar bis zu einem Jahrhundert, realisiert werden. Sogar eine kurzzeitige Erhöhung der Emissionen für ein oder zwei Jahrzehnte zum Anfang der Umstellungsperiode ist verkraftbar, sofern eine anschließende kontinuierliche Reduktion dann auch eingeleitet wird.
- Emissionspfade, die zu einer akzeptierbaren beschränkten Klimaänderung führen, ergeben sich aus optimierten Kosten-Nutzen-Analysen nur, wenn die Klimaschadenskosten nicht mit den üblichen wirtschaftlichen Diskontierungsraten abgeschrieben werden. Eine Verpflichtung zur nachhaltigen Entwicklung impliziert eine intertemporale Kostenrelation, bei der spätere Klimaschäden heutigen Klimaschäden etwa gleichgestellt werden. Eine solche näherungsweise konstante langfristige intertemporale Wertzuordnung unterscheidet sich grundsätzlich von den üblichen kurz- und mittelfristigen intertemporalen Kostenrelationen, die für Wirtschaftlichkeitsüberlegungen bei Ausgaben für Investitionen oder Konsumgüter aufgestellt werden. Grundsätzlich sollten die politisch relevanten (d.h. umsetzbaren) intertemporalen Kostenrelationen für Klimaschäden durch repräsentative Meinungsumfragen ermittelt werden, in denen die heutige Zahlungsbereitschaft („willingness to pay“) der Öffentlichkeit zur Vermeidung zukünftiger Klimaschäden festgestellt wird.

Die große Disparität zwischen den langen Gedächtnis- und Trägheitszeitskalen des Klimasystems und den wesentlich kürzeren Zeithorizonten politischer und wirtschaftlicher Planungen stellt ein grundsätzliches Dilemma der Politik dar. Techno-

logische und politische Entwicklungen lassen sich nur über einen Bruchteil des klimarelevanten Zeitskalenbereichs vorhersagen. Diese Schwierigkeit enthebt uns dennoch nicht der Verantwortung, unser Handeln bereits heute auf die nach bestmöglicher Kenntnis voraussehbaren Langzeitwirkungen unseres Tuns auszurichten.

In der derzeitigen Diskussion um die zweckmäßigste Klimaschutzstrategie spielen relativ kurzfristige Reduktionen der CO₂-Emissionen durch Sparmaßnahmen und Effizienzsteigerungen eine zentrale Rolle. Als erster Schritt sind diese Maßnahmen wegen ihrer relativ schnellen Umsetzbarkeit und geringen (nach einigen Untersuchungen zunächst sogar negativen) Kosten sicherlich sinnvoll. Langfristig ist aber eine tiefgreifende Umstellung der Energiewirtschaft auf solare und andere regenerierbare Technologien unvermeidbar. Historisch erfordert die Durchsetzung neuer Energietechnologien auch bei günstigen Marktbedingungen etwa 50 bis 100 Jahre (Nakicenovic, 1995). Ohne eine entsprechende Änderung der Rahmenbedingungen wird eine Ablösung unserer heutigen, auf billigen fossilen Brennstoffen basierenden Energiewirtschaft jedoch voraussichtlich erst nach weitgehender Ausschöpfung der fossilen Vorräte eingeleitet werden. Dies hätte zur Folge, daß wir auf den – aus Sicht der Klimaänderung langfristig nicht tragbaren – BAU-Emissionspfaden SA oder SB (Bild 4) verharren würden.

Für eine erfolgreiche Klimaschutzstrategie stellt somit eine Reduktion der Emissionen durch Effizienzsteigerung und Sparmaßnahmen einen wichtigen ersten Schritt dar, dieser muß aber durch wirksame Anreize zur notwendigen langfristigen Umstellung der Energiewirtschaft auf nichtfossile Technologien begleitet werden. Der zweite Schritt ist letztlich entscheidend und bedeutet eine wesentlich stringenter Herausforderung an die Wirtschaft. Er kann aber bei rechtzeitiger Planung ohne wirtschaftliche Dislokationen über eine längere Zeitperiode von mehreren Jahrzehnten realisiert werden – wobei die wirksame Realisierung des ersten Schrittes einen zusätzlichen Zeitpuffer verschaffen würde.

Nicht angesprochen in dieser kurzen Analyse wurden die komplexen Fragen der Realisierung einer wirksamen globalen Klimaschutzstrategie im Rahmen einer Staatengemeinschaft mit zum Teil stark divergierenden Wirtschafts- und Handelsinteressen. Hinzu kommt eine ausgeprägte Unterscheidung zwischen den wichtigsten Verursachern und Schadensträgern einer Klimaveränderung. Zur Untersuchung dieser Fragen müssen realistischere sozio-ökonomische Modelle herangezogen werden als hier geschehen. Dies erfordert eine breit angelegte interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Forschern aus den Bereichen der Politik, Wirtschaft, Sozialwissenschaft und den Medien.

Literatur

- Cline, W.R. (1992), The economics of global warming, Inst. Internat. Econ., 399 pp.
- Cubasch, U., K. Hasselmann, H. Höck, E. Maier-Reimer, U. Mikolajewicz, B.D. Santer and R. Sausen (1992), Time-dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model, *Climate Dynamics*, 8, 55-69.
- Cubasch, U., C. Hegerl, A. Hellbach, H. Höckle, U. Mikolajewicz, B. D. Santer and R. Voss (1995), A climate simulation starting from 1935, *Climate Dynamics*, 11, 71-84.
- Fankhauser, S. (1995), Valuing climate change, Earthscan, London, 180 pp.
- Hasselmann, K. (1991), How well can we predict the climate crisis? Conf. on Environmental Scarcity: The International Dimension, 5-6 July, Kiel (ed. H. Siebert), Symposien- und Konferenzbände des Instituts für Weltwirtschaft an der Universität Kiel, J.C.B. Mohr (Paul Siebeck), Tübingen, 165-183.
- Hasselmann, K., R. Sausen, E. Maier-Reimer, and R. Voss (1993). On the cold start problem in transient simulations with coupled atmosphere-ocean models. *Climate Dynamics*, 9, 53-61.
- Hasselmann, K., S. Hasselmann, R. Giering, V. Ocaña, and H. von Storch (1996a). Optimization of CO₂ emissions using coupled integral climate response and simplified cost models. A sensitivity study. MPI Report No. 192; IIASA Working Paper series; Climatic Change (in press)
- Hasselmann, K., S. Hasselmann, R. Giering, V. Ocaña, and H. von Storch (1996b). Sensitivity study of optimal CO₂ emission paths using a simplified Structural Integrated Assessment Model (SIAM). *Climatic Change* (submitted)
- Hasselmann, K. and S. Hasselmann (1996), Multi-actor optimization of greenhouse gas emission paths using coupled integral climate response and economic models, Proc. Potsdam Symp. „Earth System Analysis: Integrating Science for Sustainability“, 1994.
- Hegerl, G.C., K. Hasselmann, U. Cubasch, J.F.B. Mitchell, E. Roechner, R. Voss, J. Waszkewitz (1996), On multi-fingerprint detection and attribution of greenhouse gas- and aerosol forced climate change. MPI Report No. 207; *Climate Dynamics* (submitted)
- IPCC (1990), Climate Change. The IPCC Scientific Assessment (J.T. Houghton, G.J. Jenkins, J.J. Ephraums, eds), Cambridge University Press, Cambridge (UK)
- IPCC (1992), Climate Change 1992. The supplementary report to the IPCC Assessment (J.T. Houghton, B.A. Callander, S.K. Varney, eds), Cambridge University Press, Cambridge (UK)
- IPCC (1996), Climate Change 1995 (The Science of climate change, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell eds). Cambridge University Press, Cambridge (UK)

- Maier-Reimer, E. and K. Hasselmann* (1987), Transport and storage of CO₂ in the ocean – an inorganic ocean-circulation carbon cycle model, *Climate Dynamics*, 2, 63-90.
- Maier-Reimer, E.* (1993), The biological pump in the greenhouse, *Global and Planetary Climate Change*, 8, 13-15.
- Nakicenovic, N.* (1995) (study director), Global energy perspectives to 2050 and beyond, World Energy Council and IIASA report, World Energy Council, London.
- Nordhaus, W.D.* (1991), To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect, *Econ. J.*, 101, 920-937.
- Nordhaus, W.D.* (1993), Rolling the 'DICE': An optimal transition path for controlling greenhouse gases, *Resource and Energy Economics*, 15, 27-50.
- Tahvonen, O., H. von Storch and J. von Storch* (1994), Economic efficiency of CO₂-reduction programs, *Climate Research*, 4, 127-141.