



Klima - Umwelt - Gesellschaft

Ein interdisziplinäres Seminar der Universität Hamburg

16./17. November 1995

Beiträge von

Klaus-Dieter Almeppen
Axel Bänsch
Klaus Fraedrich
Michael Th. Greven
Klaus Hasselmann
Hans-Joachim Koch/Claudia Behrend
Dieter S. Lutz
Hans Marquardt/Johannes Westendorf
Axel Michaelowa
Walter Nellen
Michael Schatzmann/Jürgen Sündermann
Christiane Schäper
Klaus Schleicher
Gerhard Schmitz
Peter Selmer
Wolfgang Settekorn
Hans Steinhart/Hartmut Wischmann
Hans von Storch
Helmut Ziegert

Herausgeber: Universität Hamburg
Der Vizepräsident
Edmund-Siemers-Allee 1
Tel. 4123-5293

Redaktion: Dr. Harald Schlüter

Textgestaltung: Zentraler Schreibdienst

Druck: Zentrale Versand- und Vervielfältigungsstelle
der Universität Hamburg

Klima - Umwelt - Gesellschaft

Ein interdisziplinäres Seminar

der Universität Hamburg

am 16./17. November 1995

im Haus Rissen

Klaus Hasselmann

Optimierte Klimaschutzstrategien

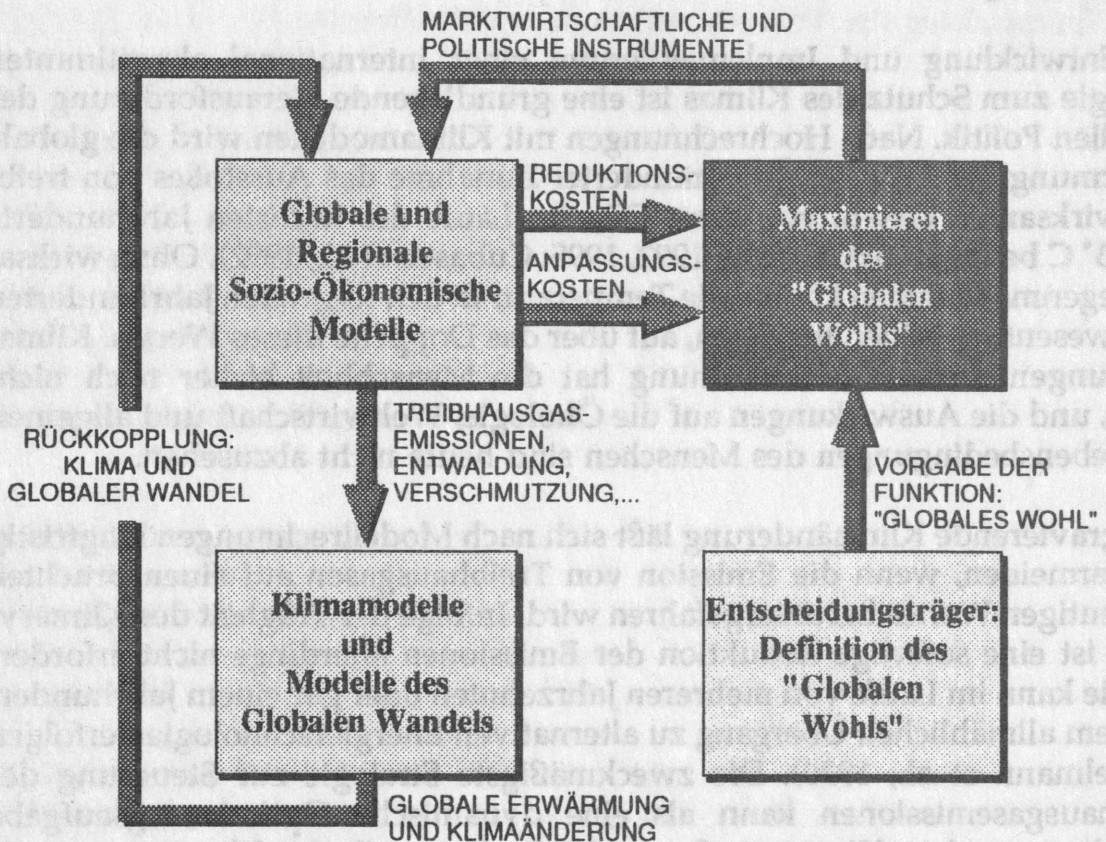
1. Einleitung

Die Entwicklung und Implementierung einer international abgestimmten Strategie zum Schutz des Klimas ist eine grundlegende Herausforderung der aktuellen Politik. Nach Hochrechnungen mit Klimamodellen wird die globale Erwärmung der Erde bei unverminderter Zunahme des Ausstoßes von treibhauswirksamen Gasen, vor allem CO₂, im Laufe des nächsten Jahrhunderts etwa 3° C betragen (IPCC 1990, 1992, 1995; Cubasch et al., 1992). Ohne wirksame Gegenmaßnahmen könnte die Temperatur in den folgenden Jahrhunderten noch wesentlich höher ansteigen, auf über das Doppelte dieses Wertes. Klimaänderungen dieser Größenordnung hat die Menschheit bisher noch nicht erlebt, und die Auswirkungen auf die Ökologie, Weltwirtschaft und allgemeinen Lebensbedingungen des Menschen sind heute nicht abzusehen.

Eine gravierende Klimaänderung läßt sich nach Modellrechnungen langfristig nur vermeiden, wenn die Emission von Treibhausgasen auf einen Bruchteil des heutigen Wertes heruntergefahren wird. Infolge der Trägheit des Klimasystems ist eine sofortige Reduktion der Emissionen allerdings nicht erforderlich, sie kann im Laufe von mehreren Jahrzehnten oder gar einem Jahrhundert in einem allmählichen Übergang zu alternativen Energietechnologien erfolgen (Hasselmann et al., 1996). Die zweckmäßigste Strategie zur Steuerung der Treibhausgasemissionen kann als eine dynamische Optimierungsaufgabe formuliert werden. 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-sozioökonomischen Systems wiedergegeben werden.

Die allgemeine Struktur eines solchen "Global Environment and Society" (GES)-Modells für "integrated assessment" Studien ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Neben den Modulen des Klimasystems und des sozio-ökonomischen Systems mitsamt ihren gegenseitigen Wechselwirkungen enthält das Modell ein "Verhandlungsmodul" (decision makers module), das die Handlungsabläufe bei der Erarbeitung einer international abgestimmten Klimaschutzpolitik simuliert. Im GES-System der Abb. 1 wird das Ergebnis dieser Verhandlung durch ein weiteres Modul, die "Weltwohlfahrtsfunktion", dargestellt. Ziel der internationalen Klimaschutzstrategie ist nach diesem Schema die kooperative Maximierung dieser gemeinsam festgelegten Weltwohlfahrtsfunktion durch entsprechend abgestimmte Steuerungsmaßnahmen aller beteiligten Akteure.

Abb. 1 Subsysteme und Wechselwirkungen eines "Global Environment and Society" (GES)-Modells (nach Hasselmann, 1991).



Voraussetzung dieser idealisierten Darstellung ist allerdings, daß durch internationale Verhandlungen die unterschiedlichen Zielvorstellungen der einzelnen Verhandlungsteilnehmer zu einer für alle Akteure verbindlichen globalen Wohlfahrtsfunktion tatsächlich zusammengeführt 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 Interessensgruppen eine globale Steuerung der summierten Emissionen unternimmt.

Wir betrachten im folgenden auch nicht die unterschiedlichen Instrumente zur Steuerung der Emission (CO_2 -Abgabesteuer, Emissionszertifikate usw.), sondern es wird vorausgesetzt, daß der Entscheidungsträger die Emission un-

mittelbar festsetzen kann. Es werden somit die optimalen Emissionspfade zur Maximierung der integrierten Weltwohlfahrt untersucht, ohne auf die Frage der Steuerungsinstrumente zur Realisierung dieser Emissionsstrategie näher einzugehen. Allerdings kommen wir zum Schluß auf einige Implikationen unserer Ergebnisse für die politische Realisierung einer effektiven Langzeit-Klimaschutzstrategie zurück.

2. Die Optimierungsaufgabe

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, die später näher erläutert, aber hier zunächst vorweggestellt werden sollen:

- (1) Sowohl die Auswirkung einer Klimaänderung als auch die Aufwendungen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen sind kostenmäßig nur schwer abzuschätzen. Im folgenden werden daher stark vereinfachte Ausdrücke für beide Kostenanteile angenommen.
- (2) Um die Gesamtkosten, aufsummiert über alle Zeiten, zu ermitteln, müssen künftige 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 Abschreibungsfaktor ab, in Anlehnung an übliche Wirtschaftlichkeitsrechnungen für ökonomische kurz- und mittelfristige Investitionen. Ökologen hingegen argumentieren, dies sei zwar für Vermeidungskosten angemessen, bedeute 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. Die für Klimahochrechnungen üblicherweise verwendeten globalen Klimamodelle 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 an komplexen Klimamodellen kalibriert wurden.
- (4) Die große Speicherkapazität des Ozeans für Wärme und CO_2 in Verbindung mit der Langlebigkeit von Treibhausgasen wie CO_2 oder FCKWs bedingt eine große Trägheit des Klimasystems. Heute in die Atmosphäre eingebrachte Treibhausgase verändern das Klima noch über mehrere hundert Jahre in der Zukunft. Eine optimierte Emissionsstrategie muß somit über sehr lange Zeithorizonte 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.

Nach diesen Vorbemerkungen wenden wir uns nun der formalen Optimierungsaufgabe zu. Wir beschränken uns im folgenden auf die Emission von CO_2 , da diese den Hauptbeitrag zum anthropogenen Treibhausgasantrieb ausmacht (ca. 60%). Zwei weitere wichtige Treibhausgase sind FCKWs (heutiger Treibhausanteil etwa 15 %) und Methan (Treibhausanteil etwa 20 %). Allerdings sind die Emissionen von FCKWs - wenn auch nicht die Konzentrationen - durch das Montreal-Abkommen bereits stark reduziert worden, während beim Methan die Quellen und Senken noch zu unsicher sind, um wirksame Steuerungsstrategien schon heute festzulegen.

Mathematische Formulierung

Gesucht wird der optimale CO_2 -Emissionspfad $e(t)$, der im oben beschriebenen Sinne die Gesamtkostensumme

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

minimiert. Dabei stellen $c_a(t)$ und $c_d(t)$ die jeweils jährlich anfallenden Vermeidungskosten ("abatement costs") bzw. die durch Klimaänderungen verursachten Schadenskosten ("damage costs") dar.

Die Zeitvariable t wird hierbei als diskrete Variable in Inkrementen von einem Jahr angegeben (wir benutzen hier die gebräuchlichere diskrete Schreibweise der Wirtschaftswissenschaften 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,

$e_A(t)$ = „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) gibt die zusätzlichen wirtschaftlichen Kosten wieder, die bei einer (positiven oder negativen) Abweichung ($r = 1$) von dem vorgegebenen business-as-usual Emissionspfad $e_A(t)$ entstehen. Die beiden folgenden Terme stellen eine einfache Parameterisierung der Trägheit des Wirtschaftssystems dar, sie geben die weiteren Anpassungskosten wieder, die durch eine zu rasche Abweichung vom BAU-Pfad verursacht werden.

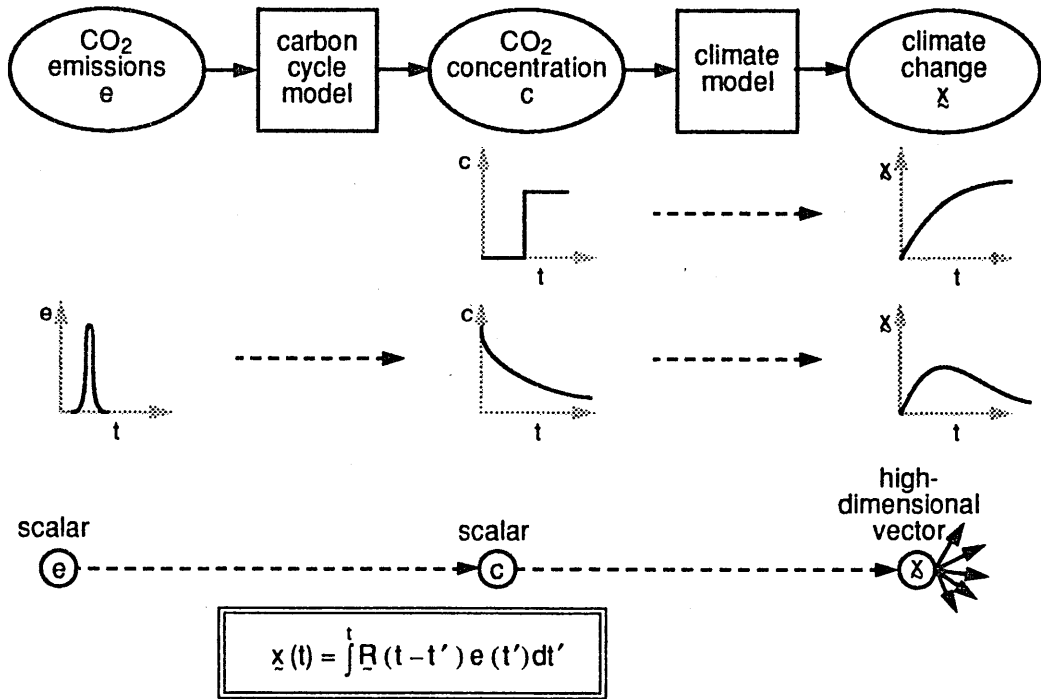
Die Klimaänderung wird in Gleichung (3) durch eine einzige Größe dargestellt, die global gemittelte Temperatur $T(t)$. Für eine genauere Kostenanalyse müßten mehrere geographisch und jahreszeitlich abhängige Klimafaktoren berücksichtigt werden, z.B. Niederschlag, Bodenfeuchte, Wolkenbedeckung und Meeresspiegel.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

Die intertemporalen Kostenrelationen sind in Gleichungen (2) und (3) durch exponentielle Abschreibungsfaktoren dargestellt. Wichtig für die späteren Ergebnisse ist die Berücksichtigung unterschiedlicher Abschreibungszeitkonstanten τ_a bzw. τ_d (inverse jährliche Abschreibungsraten) 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 Bruttosozialprodukts.

Der recht einfache Ansatz (2) für die Vermeidungskosten muß für eine genauere Analyse durch ein makroökonomisches Modell ersetzt werden. Entsprechende Modelle sind in der Tat 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).

Abb. 2 Struktur eines linearisierten "impulse - response" Klimamodells für kleine Klimaänderungen. Der Klimazustandsvektor \underline{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 Abb. 2).

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

Hierbei stellt x die Änderung einer beliebigen Klimagröße dar (in unserem Falle betrachten wir allerdings nur 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 nichtlinearen Systems. Beim Klimasystem ist die Linearisierung bei Änderungen der globalen Mitteltempe-

ratur 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). Abbildung 3 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'_T des gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modells (siehe auch Abb. 2). Man beachte das lange Gedächtnis des Klimasystems. Details sind in Hasselmann et al. (1996) wiedergegeben.

Abb. 3 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).

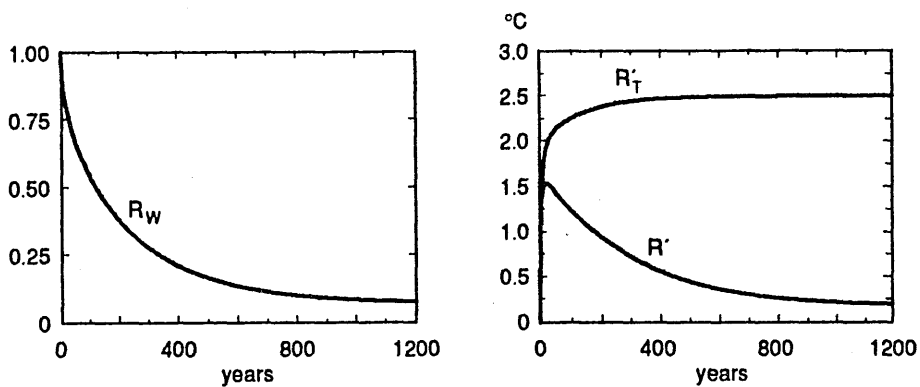
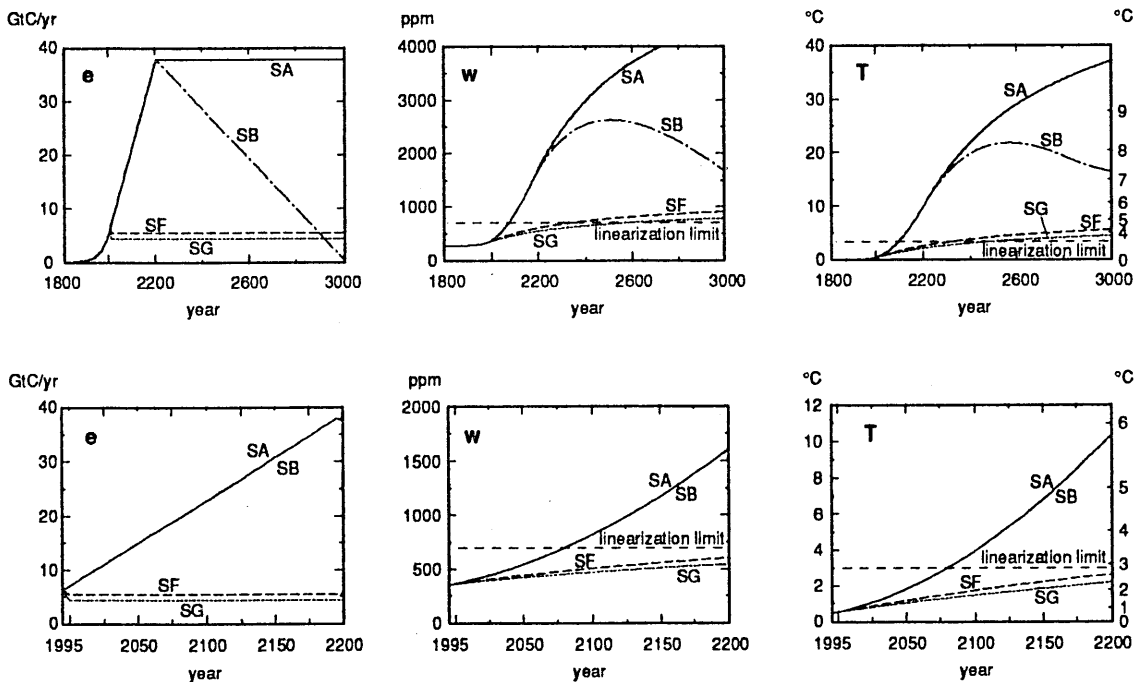


Abb. 4 Von links nach rechts: Emissionen e , CO_2 -Konzentrationen w und globale Mitteltemperaturen T für verschiedene Emissionsszenarien. Das linearisierte impulse-response-Modell ist nur unterhalb der horizontalen gestrichelten Linie gültig. Die rechte Ordinatenachse der Abbildung rechts gilt für die geschätzten Temperaturen nach Berücksichtigung der nichtlinearen logarithmischen Beziehung zwischen der CO_2 -Konzentration und der erhöhten Treibhausrückstrahlung. Die unteren Abbildungen zeigen den verkürzten Zeitabschnitt 1995 - 2200, in dem die wesentlich größeren späteren Klimaänderungen nicht aufgezeigt sind (nach Hasselmann et al., 1996).



3. Ergebnisse

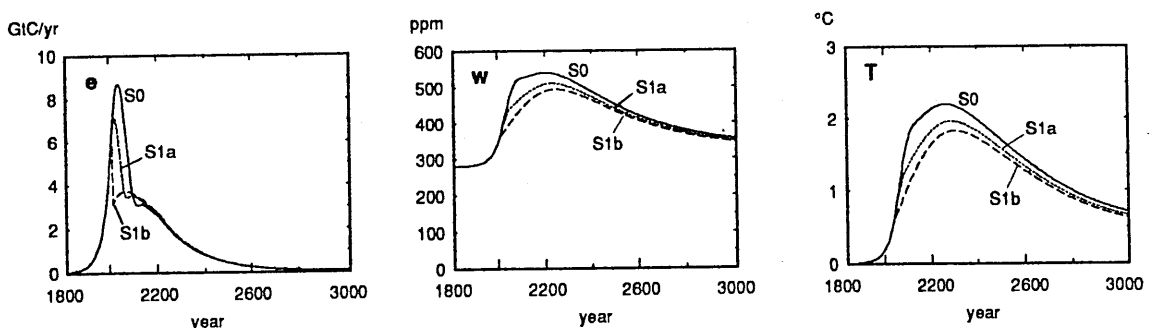
Um den Einfluß der Optimierung besser einordnen zu können, zeigt Abb. 4 zunächst die Zunahme der CO_2 -Konzentration und der globalen Temperatur für verschiedene Szenarien bei vorgegebenen CO_2 -Emissionen, d.h. ohne Optimierung der Emissionspfade. Im BAU (business-as-usual) Szenarium SA, das als Referenz 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 Abb. 4 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 diesem 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 Abbildung 5 die deutlich reduzierten CO_2 -Emissions- und Konzentrationspfade mit den dazugehörigen Temperaturverläufen für ein optimiertes Emissionsszenarium SO, mit den Parameterwerten $\tau_1 = \tau_2 = 100$ Jahre, $\tau_d = 50$ Jahre, $\tau_d = \infty$, $T_c = 1$ C, $T_c = 0.01$ 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.

Abb. 5 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).

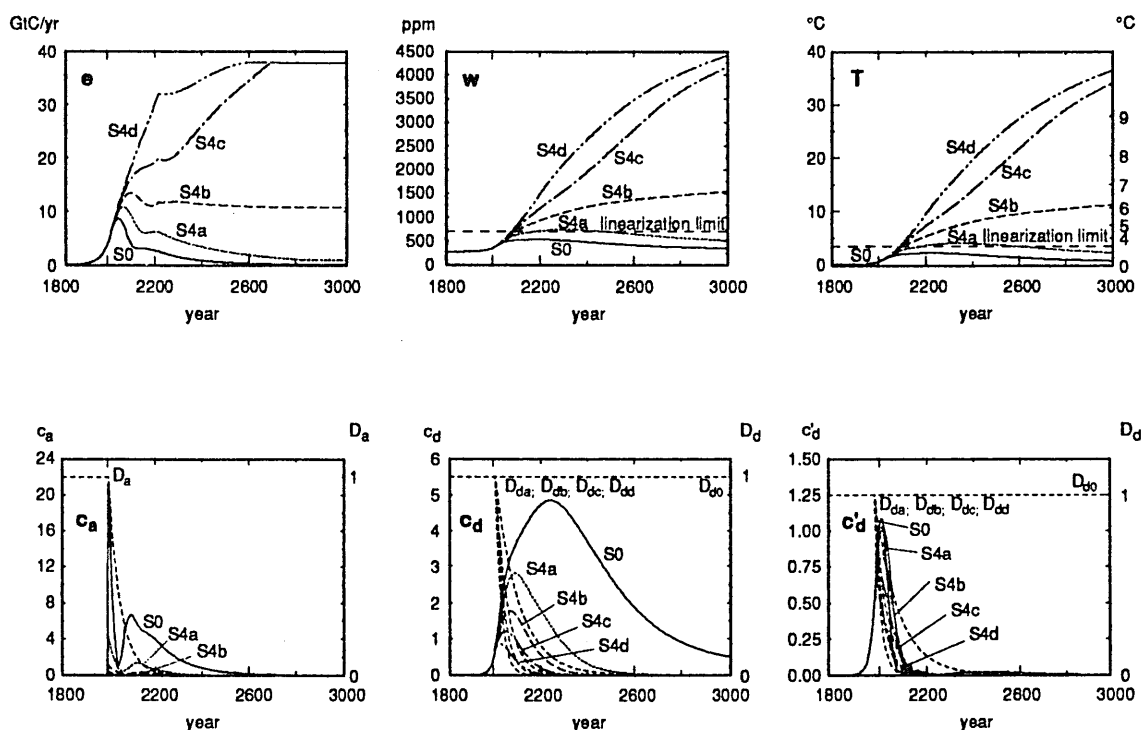


Bei allen Lösungen müssen die CO_2 -Emissionen im Verlauf von 200 bis 300 Jahren auf einen Bruchteil des heutigen Wertes heruntergefahren werden, um eine langfristige globale Erwärmung zu vermeiden. Eine Verringerung oder sogar Ausschaltung der wirtschaftlichen Trägheit im Modell reduziert bzw. vermeidet 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 Abschreibungsrate abhängig. Abb. 6 zeigt die entsprechenden Resultate, wenn an Stelle einer verschwindenden 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.

Abb. 6 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).



Mit zunehmender 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 Abschreibungsrate für Vermeidungs- und Klimaschadenskosten ($\tau_a = \tau_d = 50$ Jahre, Lauf S4b) klingen die Emissionen nicht mehr auf kleine Werte für große Zeiten ab, und wenn die Abschreibungsrate für Klimaschäden die Abschreibungsrate für Vermeidung

dungskosten 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 bringt.

4. 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 klargestellt 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 verkräftbar, 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. Technologische 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 dem - aus Sicht der Klimaänderung langfristig nicht tragbaren - BAU-Emissionspfaden SA oder SB (Abbildung 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 stringenteren 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 sozioökonomische 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.

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 (1996). *Optimization of CO₂ emissions using coupled integral climate response and simplified cost models. A sensitivity study*. MPI Report No. 192.

- 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"
- IPCC (1990), Climate Change. The IPCC Scientific Assessment (Houghton, J.T., 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 (1995), Scientific assessment of climate change (B. Bolin, J.T. Houghton, L.G. Meira, 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.