

Langfristige Perspektiven des Klimaschutzes

Gliederung

1. Einleitung
2. Gekoppelte Klima-sozioökonomische Modelle
3. Impuls-Respons-Modelle des Klimasystems
4. Szenarienrechnungen zu langfristigen Klimaänderungen
5. Optimierte CO₂-Emissionspfade
6. Ein ökonomisches Wachstumsmodell
7. Zusammenfassung und Ausblick

1. *Einleitung*

Die Gefahr einer Veränderung des Klimas durch die Emission von CO₂ und anderen Treibhausgasen ist eines der schwierigsten Umweltprobleme, vor denen die Menschheit heute steht. Wegen der Langlebigkeit der Treibhausgase im Vergleich zu ihrer Vermischungszeit verteilen sich die emittierten Treibhausgase nahezu gleichförmig in der Atmosphäre. Es sind somit alle Regionen der Erde, unabhängig vom Ort der Emission, von einer möglichen Klimaänderung betroffen. Ursachen und Auswirkungen der anthropogenen Treibhauserwärmung sind dabei ungleich verteilt: während etwa $\frac{3}{4}$ der Treibhausgase derzeit von den Industrieländern emittiert werden, werden die schwerwiegendsten Auswirkungen der Klimaänderung voraussichtlich von den ärmeren Ländern zu tragen sein. Erschwerend für eine gerechte Umstetzung des Verursacherprinzips ist ferner, daß sich die globale Erwärmung wegen der großen Trägheit des Klimasystems nur langsam entwickelt, und die gravierendsten Auswirkungen sich erst bei späteren Generationen zeigen werden, wenn die heutigen Strukturen der Weltwirtschaft durch die rapide Entwicklung der aufstrebenden Schwellenländer sowie der zunehmenden Globalisierung stark verändert sein werden.

Mit der Verabschiedung der »Framework Convention on Climate Change« (FCCC) auf dem Erdgipfel in Rio de Janeiro im Jahre 1992 wurden zum erstenmal wichtige internationale Rahmenbedingungen für die Inangriffnahme des Problems des Klimaschutzes geschaffen. Mit dem Kioto-Protokoll vom Dezember 1998 wurden dann konkrete Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen der Industrieländer fest-

gelegt (Grubb, 1999). Diese Entwicklungen haben die Klima- und Klimafolgeforschung vor wichtige neue Aufgaben gestellt (Hasselmann, 1997).

Auch wenn die Umsetzung des Kioto-Protokolls noch aussteht (es sind noch viele technische Fragen zu lösen, und es haben bisher nur wenige Staaten das Protokoll ratifiziert) steht schon heute fest, daß die vereinbarten Reduktionen nur einen bescheidenen ersten Schritt darstellen können, will man eine gravierende Klimaänderung auf lange Sicht vermeiden. Zur Ermittlung und Festlegung der zukünftigen Reduktionsmaßnahmen müssen nicht nur die bisherigen Klimahochrechnungen bei vorgegebenen Emissionsszenarien weiter verbessert werden – insbesondere im für die Impaktforschung besonders wichtigen regionalen Skalenbereich – sondern es ist auch dringend ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Klimaänderungen, dem globalen sozio-ökonomischen System und den international abgestimmten Steuerungs- und Regulierungsmaßnahmen erforderlich. Dieser Fragenkomplex ist heute noch eine weitgehende *terra incognita*, die nur in Zusammenarbeit zwischen Klimaforschern und Wissenschaftlern anderer Disziplinen, insbesondere aus dem Bereich der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, erfolgreich in Angriff genommen werden kann.

Im folgenden Beitrag sollen einige Fragen in diesem interdisziplinären Problemkreis aus Sicht der Klimaforschung beleuchtet werden. Dabei soll insbesondere das Problem der ausgeprägten Disparität zwischen den langen Zeitskalen des Klimas und den wesentlich kürzeren Zeithorizonten normaler wirtschaftlicher und politischer Planungen näher betrachtet werden (siehe hierzu auch Cline, 1992). Die große Trägheit des Klimas stellt einerseits eine Herausforderung dar, da sie zu ungewohnten Betrachtungsweisen zwingt, andererseits auch eine Chance, da sie bei rechtzeitiger Einleitung der erforderlichen strukturellen Umstellungen eine allmähliche Einführung der notwendigen Klimaschutzmaßnahmen ermöglicht, ohne gravierende Verwerfungen des globalen Wirtschaftssystems auszulösen.

2. *Gekoppelte Klima-sozioökonomische Modelle*

Die allgemeinen Wechselwirkungen zwischen Klimaänderung, der globalen Wirtschaft und politischen Steuerungsmaßnahmen, die in einem gekoppelten GES (Global Environment and Society) Modell des Klimas und des sozioökonomischen Systems wiedergegeben werden müssen, sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt (siehe hierzu auch Hasselmann et al, 1997). Die Kopplung der drei Teilsysteme erfolgt einerseits unmittelbar durch physikalische und ökonomische Wechselwirkungen, andererseits indirekt über Informationsflüsse. Diese erzeugen durch Unterrichtung der Öffentlichkeit seitens der Wissenschaft und Medien (sowie durch Beeinflussungen seitens verschiedener Interessengruppen) das öffentliche Meinungsbild, das letztlich die Voraussetzung für politisches Handeln bildet.

In Abbildung 2 sind die globalen Bereiche Politik und Wirtschaft der Abbildung 1 in einzelne politische und ökonomische Regionen und Sektoren weiter untergliedert,

mit zugeordneten Akteuren, die jeweils unterschiedliche Ziele verfolgen. Für eine realistische Modellierung des internationalen Prozesses der Entstehung eines Klimaschutzabkommen, mit expliziter Einbeziehungen der Auswirkungen vereinbarter Emissionsreduktionsmaßnahmen auf einzelne geographische Regionen und wirtschaftliche Sektoren, ist eine desaggregierte Darstellung der Wechselwirkungen innerhalb des Klima-sozioökonomischen Systems nach Abbildung 2 unabdingbar. Bisher existieren jedoch kaum realistische Modelle, mit denen die unterschiedlichen Verhandlungsstrategien und Interessenslagen der einzelnen Akteure in einer solchen Vielspieler-Darstellung des gekoppelten Klima-sozioökonomischen Systems sinnvoll simulieren werden können. In diesem Beitrag soll daher ein bescheideneres Ziel verfolgt werden: die Beleuchtung einiger Probleme, die sich aus den stark unterschiedlichen Zeitskalen der einzelnen Klima- und sozioökonomisch-politischen Untersysteme des gekoppelten Gesamtsystems ergeben. Diese lassen die sich noch im Rahmen der aggregierten Darstellung der Abbildung 1 untersuchen.

Hierzu wird angenommen, daß es durch internationale Verhandlungen gelungen ist, ein Übereinkommen über die allgemeine Zielsetzung einer weltweiten Klimaschutzpolitik zu erzielen sowie sich auf die Definition einer globalen Wohlfahrtsfunktion zu einigen, die es gilt, durch geeignete Klimaschutzmaßnahmen zu maximieren. Die globale Wohlfahrt setzt sich dabei sowohl aus den üblichen Wohlfahrtswerten zusammen (Konsum, soziale Sicherheit, Gesundheit, usw.) als auch aus den zusätzlichen negativen (und möglichen positiven) Auswirkungen einer Klimaänderung. Aufgabe der politischen Entscheidungsträger ist es dann, durch geeignete Regulierungsmaßnahmen die zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen so zu steuern, daß die Summe aus den traditionellen Wohlfahrtswerten und den zusätzlichen, klimabedingten Wohlfahrtskomponenten, über die Zeit integriert und entsprechend intertemporal diskontiert, maximiert wird.

Eine Schwierigkeit bei der praktischen Durchführung dieser Optimierungsaufgabe ist der Zugang zu geeigneten Klima- und sozioökonomischen Subsystem-Modellen, die in einem gekoppelten GES-Modell zur Lösung solcher Kosten-Nutzen-Aufgaben sinnvoll eingesetzt werden können. Realistische Klimamodelle, die die detaillierten dreidimensionalen Strömungsvorgänge in der Atmosphäre und im Ozean, Schnee- und Eisfelder, die Kreisläufe des Kohlenstoffs und anderer wichtiger biogeochemischer Substanzen, sowie die vielen anderen klimarelevanten Eigenschaften des komplexen Systems Ozean-Atmosphäre-Kryosphäre-Biogeosphäre einigermaßen realitätsgetreu wiedergeben, sind rechentechnisch viel zu aufwendig, um sie für Optimierungsaufgaben in einem gekoppelten GES-Modell einsetzen zu können. Ähnliches gilt für realistische »rechenbare allgemeine Gleichgewichtsmodelle« (CGE = Computable General Equilibrium models) des globalen Wirtschaftsystems, die gewöhnlich etwa hundert getrennte Sektoren bzw. Regionen sowie eine große Zahl empirischer Konstanten enthalten. Für gekoppelte GES-Modelle müssen daher alternative, weniger rechenaufwendige und dynamisch transparentere Modelle für die Klima- und sozioökonomischen Subsysteme entwickelt werden.

3. *Impuls-Respons-Modelle des Klimasystems*

Für das Klimasubsystem läßt sich mittels der sogenannten Impuls-Respons-Methode das dynamische Verhalten von realistischen, aufwendigen Klimamodellen in rechnerisch sehr effiziente Modelle abbilden (Hooß et al., 2000). Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß die Änderungen des Klimasystems relativ zu einem Referenzzustand des Systems so klein bleiben, daß sich die Änderungen noch linearisieren lassen. Diese Bedingung ist im allgemeinen bei Änderungen der globalen Mitteltemperatur bis etwa $2 - 3^\circ \text{C}$ noch gut erfüllt.

Das Grundprinzip eines Impuls-Respons-Modells ist in Abbildung 3 für den Fall des Treibhausgases CO_2 beschrieben. Ähnliche Darstellungen gelten für andere Treibhausgase wie Methan oder FCKW, wir werden uns jedoch im Folgenden auf CO_2 als wichtigstes Treibhausgas beschränken. Der Anteil des CO_2 am anthropogenen Treibhauseffekt beträgt heute bereits 60 % und dürfte in Zukunft noch steigen. Zur Erstellung des Impuls-Respons-Modells wird die Reaktion des Klimasystems auf eine kleine impulsartige externe Störung (eine sogenannte delta-Funktion) anhand einer Simulation mit einem vollständigen Klimamodell ermittelt. Ist das Impulsverhalten des Klimasystems für diese spezielle Störung bekannt, so kann die Reaktion des Klimasystems auf eine beliebige andere externe Störung, z.B. einen vorgegebenen Verlauf der CO_2 -Emissionen, durch Anwendung des linearen Superpositionsprinzips berechnet werden. Sämtliche dynamische Eigenschaften des vollständigen Modells, das zur Kalibrierung des Impuls-Respons-Modells verwendet wird, werden dabei im Impuls-Respons-Modell abgebildet. Somit können alle Zustandsgrößen des vollständigen Klimamodells (Temperaturfelder, Windgeschwindigkeiten, Bewölkung, Strahlung, Niederschlag usw.) auch vom Impuls-Respons-Modell berechnet werden.

Beispiele einiger Impuls-Respons-Funktionen sind in Abbildung 4 wiedergegeben. Die Kurve im linken Bild zeigt den zeitlichen Abfall der atmosphärischen CO_2 -Konzentration nach Einbringung einer Einheits- CO_2 -Menge zur Zeit $t = 0$. Das Abklingen erfolgt durch die allmähliche Aufnahme des CO_2 vom Ozean und der terrestrischen Biosphäre, bis nach einigen hundert Jahren, im Gleichgewichts-Endzustand, nur noch etwa 10 % der anfänglich eingebrachten CO_2 -Menge in der Atmosphäre verblieben ist. Bei einer rapiden Zunahme der Emissionen, wie dies im letzten Jahrhundert geschah, kann die langsame CO_2 -Aufnahme dieser Speicher jedoch mit dem Anstieg der Emissionen nicht Schritt halten. So befindet sich bis heute immer noch etwas mehr als die Hälfte des vom Menschen emittierten CO_2 in der Atmosphäre. Die beiden Kurven im rechten Bild zeigen die Temperaturzunahme des physikalischen Ozean-Atmosphäre-Systems bei einer plötzlichen Erhöhung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration, die dann entweder auf einem konstanten Wert (im Bild: bei der doppelten anfänglichen Konzentration) festgehalten wird (obere Kurve), oder allmählich, entsprechend der links gezeigten Relaxationskurve, abklingt (untere Kurve). Die untere Kurve beschreibt dann den Gesamtresponse des gekoppelten Kohlenstoffkreislauf-Atmosphäre-Ozean-Klimasystems.

Wichtigste Charakteristika aller Respons-Kurven sind ihre langen Zeitskalen, die sich einerseits aus der Wärmeaufnahme durch den Ozean (obere Kurve rechts), andererseits aus der langsamen Abnahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ergeben. Diese langsame Einstellzeit des Klimasystems hat wichtige Implikationen für die Klimaschutzpolitik.

4. Szenarienrechnungen zu langfristigen Klimaänderungen

Die langfristigen Auswirkungen der Trägheit des Klimasystems sind in Abbildung 5 anhand zweier Emissionsszenarien BAU und F (linke Bilder) veranschaulicht. Die mittleren und rechten Bilder zeigen die mit einem Impulse-Respons-Modell berechneten CO₂-Konzentrationen bzw. global gemittelten oberflächennahen Temperaturen. Die obere Bildreihe zeigt die Entwicklung in den nächsten hundert Jahren, die untere Bildreihe den weiteren Verlauf für insgesamt tausend Jahre. Beim Szenarium F wurden die Emissionen auf den Stand von 1995 eingefroren, während beim BAU (Business-As-Usual)-Szenarium die Emissionen zunächst kontinuierlich steigen, bis die fossilen Ressourcen (die auf etwa 10.000 Giga-Tonnen = 10¹³ Tonnen Kohlenstoff geschätzt wurden) im Verlauf der nächsten 200 – 300 Jahre vollständig verbraucht sind. Bis zum Jahre 2100 folgt die BAU-Emissions-Kurve etwa der vom Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC, Houghton et al, 1996, Watson et al, 1996) angenommenen wirtschaftlichen Entwicklung bei Vernachlässigung der Klimaprobleme, danach wurde die Kurve anhand der (allerdings nur unsicher zu ermittelnden) Gesamtressourcen an fossilen Brennstoffen fortgeschrieben.

Bei beiden Szenarien verbleibt die vorhergesagte globale Erwärmung innerhalb der nächsten hundert Jahre (dem üblichen Zeithorizont bei Diskussionen über Klimaschutzmaßnahmen) in überschaubaren Grenzen. In den folgenden Jahrhunderten stellt sich dann aber eine wesentlich stärkere Erwärmung ein, die größer als alle geschätzten Klimaänderungen während der letzten Million Jahre ist. Zwar ist das linearisierte Klima-Respons-Modell in diesen hohen Temperaturbereichen nicht mehr zuverlässig¹, die geschätzten Größenordnungen der globalen Erwärmung stellen jedoch ein für die Menschheit wohl kaum akzeptierbares Risiko dar. Dies gilt nicht nur für das BAU-Szenarium, sondern ebenfalls für den Fall der eingefrorenen Emissionen. Wegen der langsamen Abgabe des atmosphärischen CO₂-Eintrags an den Ozean und an die terrestrische Biosphäre steigt nämlich die CO₂-Konzentration der Atmosphäre unweigerlich weiter, solange die Emissionen nicht deutlich unter das heutige Niveau gesenkt werden.

1 In den hier abgebildeten Berechnungen wurden allerdings einige wichtige Nichtlinearitäten berücksichtigt, insbesondere die Sättigungseffekte bei der Aufnahme von CO₂ im Ozean und bei der Infrarot-Strahlungsabsorption durch CO₂, siehe Hooss et al (2000).

5. Optimierte CO₂-Emissionspfade

Da die prognostizierten Klimaänderungen weder beim BAU- Szenarium noch im Falle eingefrorener Emissionen langfristig innerhalb akzeptierbarer Schranken bleiben, stellt sich die Frage, wie stark und wie schnell die Emissionen heruntergefahren werden müssen, um die in Abbildung 5 dargestellten gravierenden Klimaänderungen zu vermeiden. Zur Ermittlung des optimalen Emissionspfads kann das Kriterium der Wohlfahrtsmaximierung angewandt werden. Die Wohlfahrt setzt sich zusammen, wie dargelegt, aus den traditionellen Wohlfahrtskomponenten, die durch normale wirtschaftliche Tätigkeit entstehen, und den (im allgemeinen negativen) Auswirkungen einer möglichen Klimaänderung. Der Einfluß des Klimas wird dabei durch zwei Kostenanteile ausgedrückt: durch die Schäden, oder Anpassungskosten, die durch die Klimaänderung verursacht werden, und durch die Kosten, die zur Vermeidung oder Verringerung der Klimaänderung aufgewendet werden. Unter »Kosten« werden hierbei sowohl normale wirtschaftliche Kosten verstanden als auch die Einbußen an nichtmonetären Werten, wie Gesundheit, sozialer Sicherheit, Artenvielfalt, sowie anderen Attributen der allgemeinen Lebensqualität.

Neben der schwierigen und kontroversen Quantifizierung des Begriffs »globale Wohlfahrt«, muß zur Durchführung der Optimierungsaufgabe, parallel zum oben dargestellten Impuls-Respons-Klimamodell, ein ähnlich vereinfachtes sozioökonomisches Modell erstellt werden, um die große Zahl iterativer Rechnungen, die bei einer numerischen Optimierung anfallen, mit einem rechnerisch effizienten GES-Modell bewältigen zu können. Beide Probleme sind von einer befriedigenden Lösung noch weit entfernt und Gegenstand aktueller Forschung. Es lassen sich jedoch einige allgemeine, relativ robuste Aussagen erzielen, die von den Details der Modelle relativ unabhängig sind und daher mit stark vereinfachten Modellansätzen gewonnen werden können.

Anstelle eines detaillierten Wirtschaftsmodells wurden in einem ersten Schritt einfache Kostenansätze für die Anpassungs- und Vermeidungsmaßnahmen eingeführt (Hasselmann et al, 1997). Es wurde angenommen, daß jede Änderung der globalen Temperatur, unabhängig vom Vorzeichen, im globalen Mittel Klimaschäden bzw. Anpassungskosten verursacht, und daß jede Abweichung von der BAU-Emissionskurve, ebenfalls unabhängig vom Vorzeichen, wirtschaftliche Verluste impliziert. Diese Ansätze lassen sich am einfachsten durch quadratische Kostenausdrücke für die Abweichungen vom jeweiligen Referenzzustand ausdrücken. Zusätzlich zu diesen Kostentermen wurden zur Erfassung der Trägheit des sozioökonomischen Systems weitere Kostenterme eingeführt, die quadratisch von der Geschwindigkeit der Klimaänderung sowie der Rate der Emissionsreduktion relativ zur BAU-Kurve abhingen.

Abbildung 6 zeigt einige optimierte CO₂-Emissionspfade, die mit diesem einfachen GES-Modell SIAM (Struktural Integrated Assessment Modell) berechnet wurden. Die Lösung S_z unterscheidet sich von der Referenz-(baseline-)Lösung S_b durch Weglassung der Trägheitsterme in den Vermeidungskosten, d.h. es wird angenom-

men, daß sich die Emissionen durch die Einführung alternativer Technologien, ohne zusätzliche Kosten durch Kapitalverluste usw., sofort herunterfahren lassen. Obwohl die Emissionen der Szenarien S_b und S_z sich kurzfristig stark unterscheiden, sind die Auswirkungen dieser Unterschiede in den langfristigen Klimaänderungen relativ gering. Für eine wirkungsvolle Klimaschutzstrategie kommt es hiernach weniger auf die kurzfristigen Reduktionsmaßnahmen als auf die langfristigen Reduktionsziele an.

Dies wird nochmal in Abbildung 7 verdeutlicht, in der die beiden Szenarien S_b und S_z mit den Kioto-Vereinbarungen verglichen werden. Die Kioto Emissionskurve für die Industrieländer liegt zwischen den beiden Lösungen S_b und S_z und erscheint aus dieser Sicht durchaus ausgewogen. Dies setzt allerdings voraus, daß die Emissionen in den folgenden Jahrzehnten, entsprechend den optimierten Lösungen S_b und S_z , weiterhin kontinuierlich heruntergefahren werden.

Die Notwendigkeit einer völligen Abkehr von fossilen Energieträgern auf lange Sicht wird durch die dritte Kurve S_d in Abbildung 6 unterstrichen. Diese unterscheidet sich von den Szenarien S_b und S_z im Diskontierungsansatz. In den Lösungen S_b und S_z wurden lediglich die Vermeidungskosten, nicht aber die Klimaschäden, diskontiert. Im Szenarium S_d , hingegen wurden beide Kostenansätze gleichermaßen diskontiert. Diese Lösung führt zu einer ähnlich gravierenden Klimaänderung wie beim BAU-Szenarium. Die Erklärung ist einfach: Da die stärksten Klimaänderungen sich erst in zwei bis drei Jahrhunderten einstellen, werden die hiermit verbundenen Klimaschäden bei üblicher Diskontierung so stark reduziert, daß sie bei der Kostenberechnung nicht mehr ins Gewicht fallen. Will man eine Aufbürdung von – nach unserer heutigen Beurteilung – untragbar erscheinenden Klimafolgekosten auf zukünftige Generationen vermeiden, so müssen Klimaschäden und Vermeidungskosten offensichtlich in Kosten-Nutzen-Analysen unterschiedlich diskontiert werden.

Die richtige Form der Diskontierung von Klimafolgekosten in Wirtschaftlichkeitsanalysen ist eine zentrale und noch intensiv debattierte Frage (siehe hierzu z.B. die Diskussionen in Hasselmann et al., 1997, Nordhaus, 1997, Heal, 1997, Brown, 1997 und Hasselmann, 1999). Letztlich geht es um die Frage der Beurteilung des zukünftigen Werts des nicht handelbaren Gutes Klima im Verhältnis zu den Werten anderer Güter, die durch den Markt bestimmt werden. Die Verwendung eines deutlich geringeren Diskontierungsfaktors für Klimaanpassungskosten bzw. Schäden als für Vermeidungskosten kann durchaus im Rahmen etablierter wirtschaftlicher Diskontierungsrechnungen gerechtfertigt werden (Hasselmann, 1999). Es muß dazu angenommen werden, daß der Wert des Erhalts unseres heutigen Klimas relativ zu den Werten marktbestimmter Güter im Laufe der Zeit zunimmt. Dieses läßt sich damit begünden, daß die Erstellung herkömmlicher Marktgüter mit dem technologischen Fortschritts ständig einfacher und somit billiger wird, während die Werte der vom Klimawandel betroffenen Güter, wie Gesundheit, Wasserverfügbarkeit, Artenvielfalt, Landverlust durch Meeresspiegelanstieg usw. unverändert bleiben oder sogar noch zunehmen. Die quantitative Erfassung dieser Bewertungsansätze (z.B. durch

Umfragen) wäre wichtig für eine fundierte Wirtschaftlichkeitsberechnung als Grundlage einer langfristig angelegten Klimaschutzstrategie.

6. *Ein ökonomisches Wachstumsmodell*

Gegen die Verwendung einfacher Kostenansätze anstelle eines vollen Wirtschaftsmodells im oben beschriebenen SIAM-Modell lassen sich mehrere Einwände vorbringen. Im Rahmen eines von der VW-Stiftung geförderten, vom Kieler Institut für Weltwirtschaft koordinierten Projektes wurde daher ein multisektorales, multiregionales CGE (Computable General Equilibrium) globales Wirtschaftsmodell entwickelt, um die kurz- und mittelfristigen Auswirkungen von Klimaänderungen und Steuerungsmaßnahmen zur Emissionsreduktion auf internationale Märkte und Preise zu ermitteln. Das Modell verwendet die Daten des regional auflösenden Impulse-Respon-Klima-Modells von Hooss et al (2000) als Input zur Berechnung der Klimaschäden. Hierüber wird an anderer Stelle berichtet (Keppler et al, in Vorbereitung). Ferner wurde ein verbessertes Wirtschaftswachstumsmodell entwickelt, das zur Ermittlung von langfristig optimierten Klimaschutzstrategien eingesetzt werden soll. Hierbei sollten insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Klimaänderungen bzw. Klimaschutzmaßnahmen und anderen kritischen wirtschaftlichen Wachstums- und Struktur Faktoren näher beleuchtet werden.

Eine schematische Darstellung des Modells ist in Abbildung 8 wiedergegeben. Neben den üblichen Produktionsfaktoren eines ökonomischen Wachstumsmodells (Arbeit, Kapital, Energieressourcen, technologische Effizienz) wurde die CO₂-Emission als weiterer Faktor eingeführt. Der Wachstumspfad wird durch zwei Agenten bestimmt: einen Unternehmer, der seinen Gewinn durch optimale Aufteilung der zur Verfügung stehenden Investitionen zwischen verschiedenen Optionen (Kapitalaufstockung, verbesserte allgemeine Technologie und erhöhte Emissionseffizienz) zu maximieren sucht, und der Staat, der die gesellschaftliche Gesamtwohlfahrt, unter Einbeziehung nicht nur des Bruttosozialprodukts sondern auch negativer Faktoren wie Klimaschäden und sozialer Belastungen wie Arbeitslosigkeit, seinerseits zu maximieren sucht. Die Optimierung erfolgt in zwei ineinander genesteten Schleifen: eine innere Optimierungsschleife, in der die Entscheidungen des Unternehmers bezüglich der Aufteilung der Gesamtproduktion zwischen Konsum und seinen Investitionsoptionen ermittelt werden, und eine äußere Optimierungsschleife, in der die Regulierungsmaßnahmen des Staates in Form von ökologischen und sozialen Steuern bestimmt werden.

Das Modell simuliert somit die Zweispielerkonflikte zwischen Wirtschaft und Staat, die jeweils unterschiedliche Zielvorstellung im Rahmen einer sozialmarktwirtschaftlichen Ordnung verfolgen. Hierbei werden neben den Klimaanpassungs- und Vermeidungskosten weitere wichtige ökonomische und soziale Faktoren berücksichtigt, wie endogene technologische Entwicklung, die Entstehung von Arbeits-

losigkeit durch Rationalisierungsmaßnahmen, und die endliche Verfügbarkeit von fossilen Ressourcen.

Einige typische Evolutionspfade, mit und ohne eine CO₂-Steuer, sind in Abbildungen 9 bzw. 10 dargestellt. Die oberen Bilder zeigen die Aufteilung der Gesamproduktion zwischen Konsum, den verschiedenen Formen von Investitionen und dem verbliebenen Unternehmergeinn (der in der derzeitigen Form des Modells, ohne Aktien- und monetären Markt, als Konsum der Aktionäre zu interpretieren ist). Das mittlere Bild zeigt die resultierenden Entwicklungen der Zustandsvariable des Modells, während das unterste Bild die entsprechenden Pfade der gesellschaftlich relevanten Faktoren, die der Staat zu steuern versucht (Beschäftigungsquote, Klimaschäden, gesellschaftliche Wohlfahrt) wiedergibt.

Die Auswirkungen der CO₂-Steuer hängen davon ab, wie die eingenommene Steuer wieder in die Wirtschaft zurückgeführt wird, z.B. zur Subvention von Emissionsreduktionsmaßnahmen oder zur Verringerung der Arbeitslosigkeit. Im vorliegenden Beispiel (Abbildung 10) wurde die zweite Option gewählt. Im Vergleich zu Abbildung 9 wurde die Beschäftigungsquote von 90-80 % auf 100 % angehoben, und die Produktion entsprechend erhöht. Wegen der stärkeren Produktionszunahme steigen auch die Klimaschäden geringfügig, obwohl die Schäden pro Produktionseinheit erwartungsgemäß abnehmen. Im (nicht gezeigten) Falle einer Rückführung der CO₂-Steuer als Subvention zur Entwicklung von alternativen Energietechnologien fallen auch die Absolutwerte der Klimaschäden.

Bei diesen Rechnungen wurden zunächst nur die Investitionsentscheidungen der Unternehmer in der inneren Optimierungsschleife, bei Vorgabe der staatlichen Rahmenbedingungen, optimiert, während die gesellschaftliche Wohlfahrt noch nicht durch systematische Abstimmung der CO₂-Steuer durch den Staat in der äußeren Optimierungsschleife maximiert wurde. Das Modell ist noch in der Entwicklung und wurde noch nicht anhand wirtschaftlicher Daten kalibriert, sodaß die gezeigten Kurvenverläufe lediglich die qualitativen Wechselwirkungen zwischen den Variablen des Modells aufzeigen, ohne Anspruch auf realistische Wiedergabe der wirklichen Verhältnisse (Barth et al, in Vorbereitung).

7. Zusammenfassung und Ausblick

Obwohl durch Anwendung eines verbesserten Wirtschaftswachstumsmodells voraussichtlich die in Abbildung 6 dargestellten Emissionspfade im Einzelnen noch modifizieren werden, sollten die allgemeinen Aussagen zur langfristigen Klimaentwicklung, die mit dem auf einfachen Preisansätzen basierenden SIAM Modell gewonnen wurden, gegenüber Details des wirtschaftlichen Modells robust sein. Entscheidendes Merkmal der beiden optimierten Szenarien S_b und S_z ist die vollständige Abwendung von fossilen Energieträgern auf lange Sicht. Diese Notwendigkeit ergibt sich, unabhängig von den Details der wirtschaftlichen Entwicklung, aus der langen Aufenthaltszeit von anthropogenem CO₂ in der Atmosphäre. Für die langfri-

stige Klimaentwicklung ist daher weniger der detaillierte Verlauf der CO₂-Emissionskurven von Bedeutung als die Gesamtsumme der Emissionen. Um eine gravierende Klimaänderung zu vermeiden, muß diese deutlich unterhalb der geschätzten Ressourcen an fossilen Energieträgern bleiben. Dies ist aber nur zu erreichen, wenn die Emissionen langfristig bewußt ganz heruntergefahren werden.

Die Berechnung optimierter Emissionspfade über Zeithorizonte von einigen hundert Jahren kann natürlich nicht der praktischen Politikberatung dienen, sondern lediglich der Beleuchtung kausaler Zusammenhänge. Weder die allgemeine wirtschaftliche und technologische Entwicklung, noch die Kosten der erforderlichen Umstellung auf nichtfossile Energieträger, lassen sich über Zeiträume von mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten vorhersagen. Wirtschaftliche und politische Entscheidungen lassen sich sinnvoll nur über Zeiträume von Jahren bis maximal ein oder zwei Jahrzehnten festlegen. Dennoch ist die langfristige Perspektive, die theoretische Optimierungsrechnungen liefern, wertvoll, um die erforderliche Zielrichtung einer effektiven Klimaschutzstrategie aufzuzeigen. Eine erfolgreiche Klimaschutzstrategie muß einerseits klare Langfristziele verfolgen, andererseits das Erreichen dieser Ziele durch eine Politik der ständig neu angepaßten kleinen Schritte zu erreichen suchen. Aus dieser Sicht liegen die Kioto-Vereinbarungen zur Reduktion der CO₂-Emissionen der Industrieländer in den nächsten zehn Jahren durchaus in der richtigen Größenordnung, dürfen aber nur als ersten Schritt auf dem Wege zu wesentlich größeren Reduktionen in den folgenden Jahrzehnten betrachtet werden.

Obwohl die lange Aufenthaltszeit von CO₂ in der Atmosphäre den fast vollständigen Verzicht auf fossile Energieträger als zwingendes langfristiges Ziel vorschreibt, hat sie andererseits den Vorteil, daß sie eine langsame Umstellung auf eine nichtfossile Energietechnologie ermöglicht. Die erforderliche Neustrukturierung der Energiewirtschaft kann somit kontinuierlich in vielen kleinen Schritten erfolgen, ohne gravierende Verwerfungen der Wirtschaft, sofern die notwendigen technologischen Entwicklungen ohne Verzögerungen rechtzeitig eingeleitet werden. Hierzu gehört insbesondere die Entwicklung der Solarenergie, als die einzige heute erkennbare, technologisch sicher erschließbare Energieform von ausreichender Kapazität zur Befriedigung des zukünftigen Energiebedarfs einer wachsenden Weltbevölkerung mit steigenden Wohlfahrtsansprüchen.

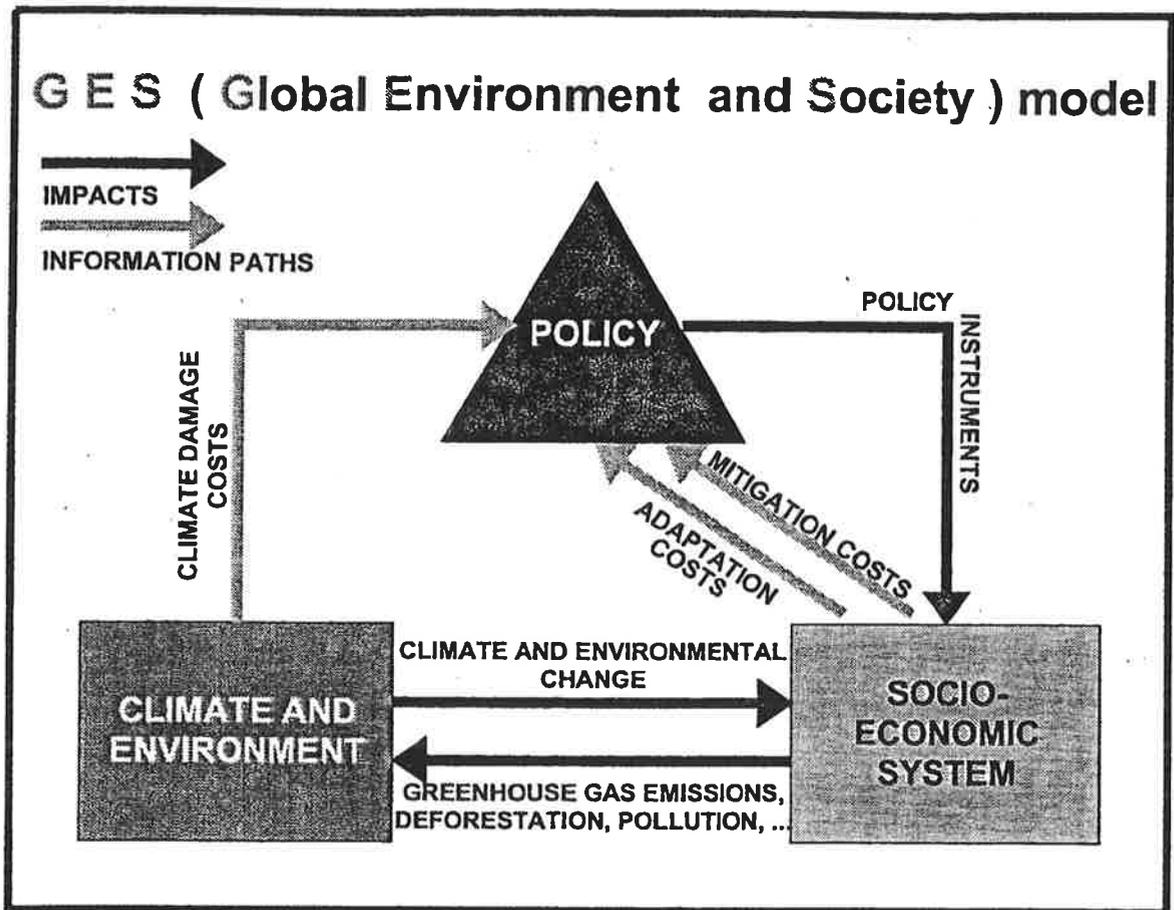
Zur wissenschaftlichen Unterstützung einer langfristigen Klimaschutzstrategie vieler, ständig neu angepaßter Regulierungsschritte sollten die bisher vorwiegend deterministisch ausgerichteten Kosten-Nutzen-Analysen auf die Fragestellung der Optimierung unter Unsicherheiten erweitert werden. Ferner müßten einige wichtige Aspekte von Vielspielerstrategien einbezogen werden. Schließlich sollten die vielseitigen Wechselbeziehungen zwischen dem Problem der anthropogenen Klimaänderung und den aktuellen Strukturfragen des globalen Wirtschaftssystems besser beleuchtet werden: Welche Rolle spielen Klimaänderungen vor der Kulisse der Umstellung der Weltwirtschaft auf eine global vernetzte Wissensgesellschaft? Wie wirken sich Klimaänderungen auf das Nord-Süd-Wohlstandsgefälle aus? Wie funktioniert die Wechselwirkung zwischen Wissenschaft, Medien, öffentlicher Meinung

und Politik, die letztlich den Boden aller politischen Entscheidungen vorbereitet, in einem globalen Kommunikationsnetz? Ein Vergleich der drei Arbeitsgruppenbeiträge des letzten IPCC-Berichtes zur globalen Klimaveränderung (Houghton et al, 1996, Watson et al, 1996, Bruce et al, 1996) macht deutlich, daß die IPCC Arbeitsgruppen 2 und 3, die sich mit den Auswirkungen von Klimaänderungen und möglichen Regulierungsmaßnahmen befaßten, noch erheblichen Nachholbedarf relativ zur Arbeitsgruppe 1, die den wissenschaftlichen Stand zur Klimaveränderung darstellte, aufzuweisen haben. Es liegt hier ein reiches Betätigungsfeld vor für eine fruchtbare Zusammenarbeit zwischen der Klimaforschung und den Wirtschafts- und Sozialdisziplinen.

Literatur

- Brown, P.G.*, 1997: Stewardship in Climate. An Editorial Comment. *Climatic Change*, 37, 329-334.
- Bruce, J.P., H. Lee and E.F. Haites*, 1996, Climate change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contributions of Working Group 3 to the Second Scientific Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp 448
- Cline, W.R.*, 1992: The Economics of Global Warming. *Inst. Internat. Econ.*, pp. 399.
- Grubb, M.* (with C. Vrolijk and D. Brack), 1999, The Kyoto Protocol, Royal Institute of International Affairs, London, pp. 342
- Hasselmann, K.*, 1997, Climate-Change Research after Kyoto. *Nature*, 390, 225-226.
- Hasselmann, K.*, 1999: Intertemporal Accounting of Climate Change – Harmonizing Economic Efficiency and Climate Stewardship. *Climatic Change*, 41, 333-350.
- Hasselmann, K., S. Hasselmann, R. Giering, V. Ocaña, and H. v. Storch*, 1997: Sensitivity Study of Optimal CO₂ Emission Paths Using a Simplified Structural Integrated Assessment Model (SIAM). *Climatic Change*, 37, 345-386.
- Heal, G.*, 1997: Discounting and Climate Change. An Editorial Comment. *Climatic Change*, 37, 335-343.
- Hooss, G., R. Voss, K. Hasselmann, E. Maier-Reimer, and F. Joos*, 2000: A Nonlinear Impulse Response Model of the Coupled Carbon Cycle-Ocean-Atmosphere Climate System. *Climate Dynamics* (submitted).
- Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell*, 1996: Climate change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group 1 to the Second Scientific Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp 572.
- Nordhaus, W.D.*, 1997: Discounting in Economics and Climate Change. An Editorial Comment. *Climatic Change*, 37, 315-328.
- Watson, R.W., M.W. Zinyowera, R.H. Moss, D.J. Dokken*, 1996, Climate change 1995. The Science of Climate Change. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contributions of Working Group 2 to the Second Scientific Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp 879.

Abbildung 1



Wechselwirkungen zwischen dem Klimasystem, dem sozioökonomischen System und den politischen Entscheidungsträgern in einem gekoppelten Klima-sozioökonomischen Modell. Neben den unmittelbaren physikalischen und ökonomischen Wechselwirkungen spielen auch die Informationsflüsse eine wichtige Rolle bei der politischen und wirtschaftlichen Entscheidungsfindung.