Vorsorgeprinzip und Klimawandel: Der Leitplankenansatz

***Thomas Kleinen*[1]*, Hans-Martin Füssel*[1]*, Thomas Bruckner*[2]**

1: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Postfach 601203, 14412 Potsdam, email: kleinen@pik-potsdam.de, fuessel@pik-potsdam.de
2: Institut für Energietechnik, Technische Universität Berlin, Marchstr. 18, 10587 Berlin, email: bruckner@iet.tu-berlin.de

1. Einleitung

Durch den Ausstoß von Treibhausgasen beeinflusst die Menschheit die Strahlungsbilanz der Erde und verändert das Klima im globalen Maßstab (IPCC 2001a). Eine Änderung des Klimas wiederum führt zu vielfältigen Auswirkungen auf die natürliche Umwelt und die Gesellschaft (IPCC 2001b). Das Wissen um die Verwundbarkeit menschlicher Gesellschaften bezüglich dieser Klimafolgen („Impakts") bildet die Grundlage für die wissenschaftlichen und politischen Anstrengungen zur Erforschung und Eindämmung des globalen Klimawandels. So wird in Artikel 2 des Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (Klimarahmenkonvention, UNFCCC) von 1992 als deren Ziel angegeben (FCCC 1992),

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

Dieses bei oberflächlicher Betrachtung recht einfach erscheinende Ziel erweist sich als außerordentlich schwierig zu konkretisieren. Was ist eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems? Bei welcher Treibhausgaskonzentration wird eine solche Störung (gerade noch) verhindert? Was bedeutet „natürliche Anpassung" von Ökosystemen?

Es ist zu beachten, dass die aufgeworfenen Fragen sowohl wissenschaftliche als auch normative Aspekte beinhalten. Zwar kann die Wissenschaft versuchen, die Zusammenhänge zwischen dem Ausstoß von Treibhausgasen, globalen und regionalen Klimaänderungen sowie deren Auswirkungen immer besser zu verstehen. Die Entscheidung, ob bestimmte Änderungen als „gefährlich" anzusehen sind, ist letztlich jedoch eine Wertentscheidung, die im Dialog zwischen Gesellschaft und Wissenschaft getroffen werden muss. Eine solche Entscheidung wird allerdings erschwert durch nach wie vor bestehende große Unsicherheiten hinsichtlich des Klimawandels und seiner Folgen. Die Klimarahmenkonvention betont in diesem Zusammenhang das Vorsorgeprinzip, wenn sie in Artikel 3(3) fordert:

> *„In Fällen, in denen ernsthafte oder nicht wiedergutzumachende Schäden drohen, soll das Fehlen einer völligen wissenschaftlichen Gewissheit nicht als Grund für das Aufschieben solcher Maßnahmen dienen..."*

Die Anwendung des Vorsorgeprinzips beinhaltet sowohl, das Klimasystem nicht in solche Zustände gelangen zu lassen, über deren Auswirkungen keine hinreichenden Kenntnisse bestehen, als auch, eine Veränderung des Klimas zu vermeiden, die nach heutigem Wissensstand mit inakzeptablen Folgen verbunden sein dürfte.

Der im folgenden Text vorgestellte *Leitplankenansatz* (englisch: *Tolerable Windows Approach, TWA)* bildet einen entscheidungstheoretischen Rahmen für die wissenschaftsbasierte Politikberatung, um das Vorsorgeprinzip auf die Klimaproblematik anzuwenden und sich damit den genannten Zielen der Klimarahmenkonvention anzunähern. Seine herausragende Eigenschaft besteht darin, im Rahmen einer Inversanalyse die Gesamtheit der Klimaschutzstrategien zu ermitteln, die mit zuvor bestimmten Mindestkriterien („Leitplanken“) verträglich sind. Diese normativ zu setzenden Leitplanken sollen dabei einerseits unerwünschte Folgen des Klimawandels ausschließen und andererseits inakzeptable gesellschaftliche Belastungen durch Klimaschutzmaßnahmen verhindern. Zur Umsetzung des Leitplankenansatzes wurde im ICLIPS-Projekt ein integriertes Modell des globalen Klimawandels entwickelt.

Der folgende Text beginnt mit einer Einführung in den Klimawandel und seine Folgen. Daran anschließend werden die wichtigsten entscheidungstheoretischen Ansätze für die integrierte Bewertung des Klimawandels vorgestellt. Im dritten Abschnitt wird die Konzeption des Leitplankenansatzes erläutert, und im vierten Abschnitt wird das auf diesem Ansatz basierende ICLIPS-Modell dargestellt. Abschließend werden einige Ergebnisse dieses Modells vorgestellt und ein Ausblick auf die Berücksichtigung von Unsicherheiten gegeben.

2. Der Klimawandel und seine Folgen

Das Klimasystem ist ein gekoppeltes System, dessen wichtigste Komponenten Atmosphäre, Hydrosphäre (Wasser), Cryosphäre (Eis), Landoberfläche und Biosphäre sind. Unter den verschiedenen externen Einflüssen, die die Dynamik des Klimasystems bestimmen, ist die Sonne der wichtigste; menschliche Einflüsse haben jedoch stark an Bedeutung gewonnen.

Die Kopplungen der einzelnen Teilsysteme des Klimasystems weisen eine sehr große Bandbreite hinsichtlich der relevanten räumlichen und zeitlichen Skalen auf. Darüber hinaus sind viele der Prozesse und Wechselwirkungen im Klimasystem nichtlinear (IPCC 2001a). Ein derart komplexes nichtlineares System kann chaotisches Verhalten zeigen. Dies bedeutet, dass kleine Änderungen in den Anfangsbedingungen einen großen Einfluss auf das zukünftige Verhalten des Systems haben können — mit wichtigen Auswirkungen auf die Vorhersagbarkeit des Systems. Wettervorhersage sind beispielsweise nur für einen Zeitraum von maximal zwei Wochen möglich (IPCC 2001a). Zwar verhält sich das Klima als statistische Größe deutlich weniger empfindlich gegenüber veränderten Anfangszuständen als das Wetter; die Schwierigkeiten und Unsicherheiten bei der Simulation zukünftiger Klimazustände dürfen dennoch nicht unterschätzt werden.

Als weitere Folge der Nichtlinearität des Klimasystems ist die Existenz von Schwellwerten zu erwarten, bei deren Überschreiten eine gravierende Änderung des Klimas eintreten würde. Es ist beispielsweise davon auszugehen, dass die thermohaline Ozeanzirkulation, die unter anderem den Nordatlantikstrom antreibt und dadurch für das vergleichsweise milde Klima im Norden und Westen Europas

verantwortlich ist, beim Überschreiten gewisser Grenzwerte hinsichtlich der Temperatur und des Salzgehaltes des Meerwassers im Nordatlantik vollständig zusammenbrechen würde. Ein solcher Zusammenbruch wurde in der Klimageschichte mehrfach beobachtet, und einige Klimamodelle haben dieses Verhalten bereits simuliert (IPCC 2001b).

Menschliche Aktivitäten waren schon immer mit Auswirkungen auf die Umwelt verbunden, zunächst aber nur auf lokaler oder allenfalls regionaler Ebene. Seit der industriellen Revolution greift die Menschheit jedoch massiv in das globale Klimasystem ein. Der Wichtigste dieser Eingriffe ist die Verstärkung des (natürlichen) Treibhauseffekts durch die Emissionen von Treibhausgasen, insbesondere Kohlendioxid, Methan und Lachgas. Durch die erhöhte atmosphärische Konzentrationen dieser Spurengase, die die Wärmeabstrahlung von der Erde in das All reduzieren, verändert sich die Energiebilanz der Atmosphäre mit der Folge eines globalen Temperaturanstiegs.

Der internationale Stand der Klimaforschung wird regelmäßig in Berichten des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change; deutsch: Zwischenstaatlicher Ausschuss über Klimaänderungen) dargestellt. Diese Sachstandsberichte fassen die Ergebnisse wissenschaftlicher Fachveröffentlichungen über den Klimawandel, seine Auswirkungen sowie mögliche Klimaschutzmaßnahmen zusammen. Vor ihrer Veröffentlichung unterlaufen sie einem mehrstufigen Reviewprozess und werden abschließend von den Regierungen aller im IPCC vertretenen Staaten im Konsens verabschiedet.

Nach dem aktuellen Bericht der Arbeitsgruppe 1 des IPCC (IPCC 2001a) ist die Oberflächentemperatur der Erde im globalen Mittel zwischen 1861 und 2000 um 0,6°C (mit einer Unsicherheit von 0,2°C) angestiegen, wobei die Temperaturerhöhung in hohen Breiten und über den Kontinenten besonders groß war. Ohne weit reichende Maßnahmen zum Klimaschutz würde sich die globale Mitteltemperatur bis 2100 um weitere 1,4 – 5,8°C erhöhen. Die verhältnismäßig große Bandbreite dieser Prognose ist in gleichem Maße auf Unsicherheiten über den zukünftigen Ausstoß von Treibhausgasen wie auf wissenschaftliche Unsicherheiten hinsichtlich der Reaktion des Klimasystems hierauf zurückzuführen. Eine der wichtigsten klimatischen Auswirkungen einer solchen Erwärmung besteht in einer Veränderung des globalen Wasserkreislaufs (IPCC 2001a). Als „Faustregel“ kann davon ausgegangen werden, dass heutzutage schon trockene Gebiete noch trockener werden, während Gebiete, die heute schon feucht sind, noch feuchter werden.

Selbst stetige klimatische Änderungen gehen mit weit reichenden Auswirkungen auf natürliche und soziale Systeme einher. So ist zum Teil schon heute eine Verschiebung von Vegetationszonen in höhere geografische Breiten und in größere Höhen beobachtbar. Dies betrifft naturnahe Ökosysteme ebenso wie die vom Menschen betriebene Land- und Forstwirtschaft. Klimatische Änderungen sind auch mit Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit verbunden. So ist beispielsweise davon auszugehen, dass sich aufgrund der globalen Erwärmung das potentielle Verbreitungsgebiet der „Tropenkrankheit“ Malaria vergrößern und die Belastung durch Hitzewellen zunehmen wird (IPCC 2001b).

Aufgrund der starken Nichtlinearität des Klimasystems ist mit „irregulären“ Reaktionen des Klimasystems auf steigende Treibhausgaskonzentrationen zu

rechnen, einschließlich der Möglichkeit von „überraschenden“ großräumigen Klimaänderungen. Neben dem Zusammenbruch der thermohalinen Ozeanzirkulation und Änderungen des asiatischen Monsuns ist hier auch die Möglichkeit des Auseinanderbrechens des Westantarktischen Eisschildes zu nennen. Ein darauf folgendendes Abrutschen ins Meer würde einen globalen Anstieg des Meeresspiegels um etwa 6 Meter bewirken, mit offensichtlichen dramatischen Konsequenzen für die Bevölkerung nicht nur in Küstenregionen (IPCC 2001b).

3. Integrierte Bewertung des Klimawandels

Die wissenschaftliche Analyse des Klimawandels fand lange Zeit nach Disziplinen getrennt statt. Meteorologen und Ozeanographen haben mit gekoppelten Klimamodellen das Klimasystem simuliert; Ökologen, Agrarwissenschaftler und Hydrologen versuchten, die Auswirkungen der simulierten Klimaänderungen auf naturnahe Ökosysteme, die Landwirtschaft und die Wasserverfügbarkeit zu bewerten; Ingenieure und Ökonomen versuchten zuletzt, die technische Machbarkeit und die Kosten von Emissionsminderungsstrategien abzuschätzen.

Die fehlende Abstimmung dieser Gruppen führte dazu, dass die Forschungsergebnisse kaum vergleichbar waren und ihre Relevanz für politische Entscheidungen begrenzt blieb. Diese Erkenntnis führte in den späten 80er Jahren dazu, dass verschiedene Forschungsgruppen versuchten, multidisziplinäre Ansätze in einem konsistenten Rahmen zu integrieren, der die Untersuchung politikrelevanter Fragestellungen erlaubte. Diese Vorgehensweise wird als integrierte Bewertung des Klimawandels (englisch: Integrated Assessment) bezeichnet. Ein wichtiges Werkzeug hierbei sind Computermodelle, die die gesamte Wirkungskette von den anthropogenen Treibhausgasemissionen über die klimatischen Veränderungen bis hin zu deren Wirkungen auf natürliche und soziale Systeme abbilden.

Sicherlich sind nicht alle Aspekte von Klimaschutzstrategien einer modellgestützten Analyse zugänglich. Die Nutzung von integrierten Modellen erlaubt es aber, die bei der Analyse komplexer gesellschaftlicher Probleme notwendigerweise vorherrschende qualitative Analyse durch quantitative Aussagen zu ergänzen. Integrierte Modelle des globalen Klimawandels setzen insbesondere folgende Aspekte miteinander in Beziehung:

- die voraussichtlichen Folgen zukünftiger Klimaänderungen mit dem erforderlichen Aufwand zur Abschwächung des Klimawandels sowie zur Anpassung an den Klimawandel;
- globale Emissionsminderungsstrategien mit regionalen Klimafolgen und regional wirksamen Anpassungsmaßnahmen;
- die meist langen Zeitskalen, auf denen Klimafolgen auftreten mit den eher kurzfristigen Zeitskalen, für die (etwa im Kyoto-Protokoll) Maßnahmen zur Emissionsminderung vereinbart werden.

Integrierte Modelle des Klimawandels können nach den im folgenden dargestellten Modellierungsansätzen unterschieden werden (IPCC 1996b):

- Politikbewertungsmodelle:

  Die Modelle dieser Modellklasse versuchen, die physikalischen, ökologischen,

ökonomischen und sozialen Konsequenzen *vordefinierter* Klimaschutzstrategien zu bestimmen. Sie bestehen aus detaillierten prozessbasierten Teilmodellen, die teilweise rückgekoppelt zusammenwirken und eine oftmals regional aufgelöste Abschätzung der langfristigen Dynamik des komplexen Mensch-Klima-Systems erlauben. Typische Vertreter dieser Modellkategorie sind die Modelle IMAGE (Alcamo 1994; Alcamo et al. 1998), TARGETS (Rotmans et al. 1994) und AIM (Morita et al. 1993).

Die Vorgabe einer begrenzten Anzahl an zu untersuchenden Klimaschutzstrategien (szenariobasierter Ansatz) erlaubt den Einsatz komplexer Teilmodelle (z. B. für die Kreisläufe der Spurengase, das Klimasystem sowie die Auswirkungen von Klimaänderungen) und die Durchführung dementsprechend tiefgehender Untersuchungen. Dem steht als Nachteil gegenüber, dass eine tolerierbare Klimaschutzstrategie u. U. erst am Ende eines langwierigen Prozesses von Versuch und Irrtum ermittelt werden kann.

- Politikoptimierungsmodelle:

  Die Modelle dieser Klasse sind bestrebt, klimapolitisch relevante Kontrollvariablen wie z. B. Emissionsreduktionsraten bzw. Steuern auf den CO_2-Ausstoß im Hinblick auf das Erreichen eines vom Modellierer vorgegebenen Zieles zu optimieren. Typische Vertreter sind beispielsweise die Modelle DICE (Nordhaus 1994), MERGE (Manne et al. 1995) und SIAM (Hasselmann et al. 1997).

  Die meisten Politikoptimierungsmodelle basieren auf dem Ansatz der Kosten-Nutzen-Analyse (KNA). Hierbei wird versucht, sowohl die Kosten von Emissionsminderungsmaßnahmen als auch deren Nutzen (d. h. die dadurch vermiedenen klimabedingten Schäden) zu bestimmen, einander gegenüber zu stellen und diejenige Strategie zu ermitteln, welche die globale Wohlfahrt maximiert. Ein grundlegendes Problem dieses Ansatzes besteht in der Notwendigkeit der umfassenden Monetarisierung und globalen Aggregierung aller Auswirkungen des Klimawandels. Ein solches Verfahren beinhaltet die Gefahr, dass kritische Probleme und Annahmen sowie die Notwendigkeit von mannigfachen Werturteilen verdeckt werden (Helm et al. 1999). Besonders kontrovers diskutiert wird die Monetarisierung des Verlustes von Menschenleben. Die Zugrundelegung von ökonomischen Standardannahmen könnte z. B. dazu führen, dass ein durch verstärkte Überflutungen ausgelöste Verlust von einer Million Menschenleben in einem Entwicklungsland durch ein geringfügig stärkeres Wachstum der Volkswirtschaften in Industrieländern kompensiert wird, ohne dass dies im Ergebnis sichtbar wäre. Ähnlich problematisch ist die Abdiskontierung von zukünftigen Schäden, um diese mit heutigen Kosten in Beziehung zu setzen. Eine aussagekräftige Anwendung der Kosten-Nutzen-Analyse erfordert darüber hinaus, dass alle relevanten Zusammenhänge zwischen dem globalen Klimawandel und seinen regionalen Folgen zumindest näherungsweise quantitativ beschrieben werden können. Da die bestehenden Unsicherheiten in diesem Bereich einer probabilistischen Beschreibung oftmals nicht zugänglich sind, können sie im Rahmen der Optimierung nicht sinnvoll berücksichtigt werden.

- Politikleitmodelle:

Politikleitmodelle stellen die jüngste Kategorie von integrierten Modellen des Klimawandels dar. Neben dem bereits beschriebenen, auf dem Leitplankenansatz basierenden, ICLIPS-Modell gehört auch die so genannte „Safe Landing Analysis" (Alcamo & Kreileman 1996) zu dieser Kategorie.

Politikleitmodelle gehen von normativ zu setzenden Grenzen („Leitplanken") für die Belastbarkeit der Bevölkerung durch Klimafolgen einerseits und Klimaschutzanstrengungen andererseits aus und bestimmen den mit diesen Leitplanken verträglichen klimapolitischen Spielraum. Zu den grundlegenden Eigenschaften dieser Ansätze gehört die explizite Trennung von normativen Entscheidungen und wissenschaftlicher Analyse, die hohe Flexibilität in Bezug auf unterschiedliche normative Vorgaben von Seiten der zu beratenden klimapolitischen Entscheidungsträger sowie die Fähigkeit, durch Vorgabe von „Grenzen des Wissens" auch Aspekte partieller Unwissenheit zu berücksichtigen.

Politikleitmodelle rücken die Gesamtheit der mit den gesetzten Grenzen kompatiblen Klimaschutzpfade in den Vordergrund und vermeiden dadurch die bei Politikbewertungsmodellen oftmals anzutreffende Fokussierung auf einige wenige Szenarien. Im Vergleich zu Politikoptimierungsmodellen ist zu betonen, dass eine umfassende Monetarisierung von Klimafolgen nicht erforderlich ist. Politikleitmodelle versuchen somit die Lücke zwischen den bisher dominierenden Ansätzen zu schließen, ohne dass andere Modellierungskonzepte dadurch obsolet würden.

4. Der Leitplankenansatz

Der Leitplankenansatz wurde erstmals 1995 vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) als Fensteransatz vorgeschlagen (WBGU 1995; 1997) und in der Folgezeit im ICLIPS-Projekt (**I**ntegrated Assessment of **Cli**mate **P**rotection **S**trategies) am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) weiterentwickelt (Petschel-Held et al. 1999; Bruckner et al. 1999; Helm et al. 1999; Schellnhuber & Bruckner 1998). Dieser Ansatz ist nicht alleine auf den Bereich des globalen Klimawandels zugeschnitten, sondern kann auch in anderen Bereichen der Forschung zum globalen Wandel, insbesondere im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion, Anwendung finden.

Kurzgefasst lässt sich die Anwendung des Leitplankenansatzes wie folgt beschreiben: In einem ersten Schritt werden im Dialog zwischen Wissenschaftlern und Entscheidungsträgern eine Reihe von Leitplanken bestimmt, die sowohl gefährliche Klimaänderungen als auch sozioökonomisch nicht akzeptable Klimaschutzmaßnahmen ausschließen sollen. Ausgehend davon wird durch eine modellgestützte wissenschaftliche Analyse der relevanten Teile des „Systems Erde" (Abbildung 1) die *Gesamtheit aller Klimaschutzstrategien* bestimmt, die mit den normativ gesetzten Leitplanken verträglich sind. Hierdurch ist es insbesondere möglich, unter Berücksichtigung der Trägheit des sozioökonomischen Systems und des Klimasystems mittelfristige Emissionsreduktionsziele zu bestimmen, die mit langfristig definierten Klimaschutzzielen verträglich sind.

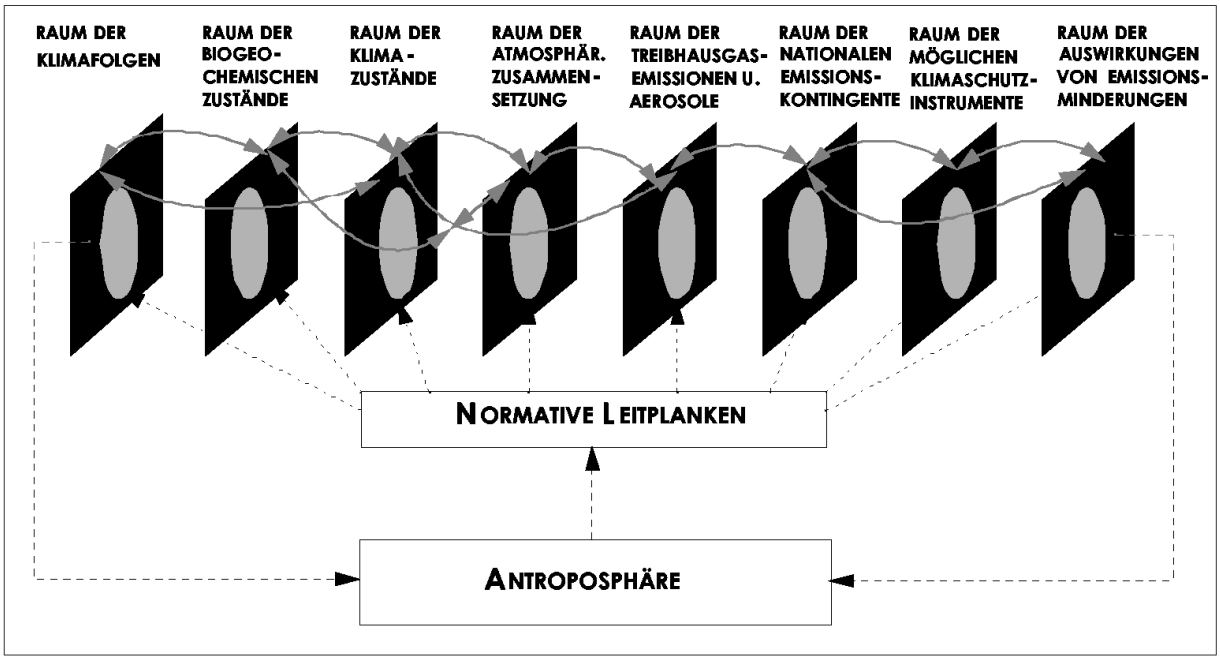

Abbildung 1: *Beispiele für Zusammenhänge (durchgezogene Pfeile) zwischen den Teilbereichen (schraffierte Flächen) des globalen Klimawandels. Neben Einflüssen zwischen benachbarten Räumen (z. B. Temperaturabhängigkeit biogeochemischer Zustände) sind auch weiterreichende Beziehungen (z. B. Kohlendioxidabhängigkeit des Pflanzenwachstums) relevant. Die Vorgabe von Leitplanken führt primär zu einer Begrenzung der zugelassenen Entwicklungspfade auf die Elemente der grau wiedergegebenen „Fenster". Die durchgezogenen Doppelpfeile deuten an, dass sich diese Begrenzungen beidseitig auswirken. (Schellnhuber & Bruckner, 1998)*

Abbildung 1 zeigt die wichtigsten, miteinander gekoppelten Teilbereiche des globalen Klimawandels. Prinzipiell können in *jedem* dieser Teilbereiche Leitplanken gesetzt werden, die die Menge der akzeptablen Klimaschutzstrategien begrenzen.

Solange es aufgrund des unzureichenden Wissensstands schwierig ist, soziale Folgen des Klimawandels oder von Emissionsminderungen umfassend zu quantifizieren, kann es sinnvoll sein, bei der Setzung von Leitplanken auf einfacher zu bestimmende Hilfsvariablen zurückzugreifen. So kann etwa die Änderung der globalen Mitteltemperatur als Indikator für damit verbundene Klimaänderungen angesehen werden. Die Festlegung entsprechender Leitplanken könnte sich dann an den Grenzen des Wissens orientieren. Auf diese Weise ist es möglich, Aspekte des Vorsorgeprinzips quantitativ in die Entscheidungsfindung einzubinden (Schellnhuber & Bruckner 1998).

Dessen ungeachtet strebt das ICLIPS-Modell an, Klimaschutzziele möglichst aus den erwarteten negativen Folgen einer Klimaänderung abzuleiten. Um diesen Ansatz praktisch umsetzen zu können, wurde das Konzept der *Klimawirkungsfunktionen* (Climate Impact Response Functions, CIRFs) entwickelt (Füssel & van Minnen 2001; Füssel et al. 2003). Klimawirkungsfunktionen repräsentieren den Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen relevanten Dimensionen der anthropogenen Klimaänderung („Klimaindikatoren") einerseits und einem aggregierten Indikator für sektoral und regional spezifische Klimafolgen („Impaktindikator") andererseits. Neben der Information über zu erwartende Auswirkungen des Klimawandels ermöglicht es die Anwendung von Klimawirkungsfunktionen, Leitplanken für inakzeptable Klimafolgen in zugehörige „Klimafenster" zu übersetzen, welche die erlaubte Veränderung in

klimatischen Variablen wie dem Ausmaß und der Rate der Temperaturänderung begrenzen.

Wir möchten an dieser Stelle betonen, dass die Leitplankensetzung und damit die Festlegung, welches Niveau einer Klimaveränderung nicht mehr toleriert wird, als eine normative Entscheidung angesehen wird, die Aufgabe entsprechend legitimierter gesellschaftlicher Gremien ist. Die wissenschaftliche Analyse kann bei der Festsetzung von Klimaschutzzielen zwar eine wichtige Hilfestellung leisten, sollte diese letztlich normative Entscheidung aber nicht determinieren.

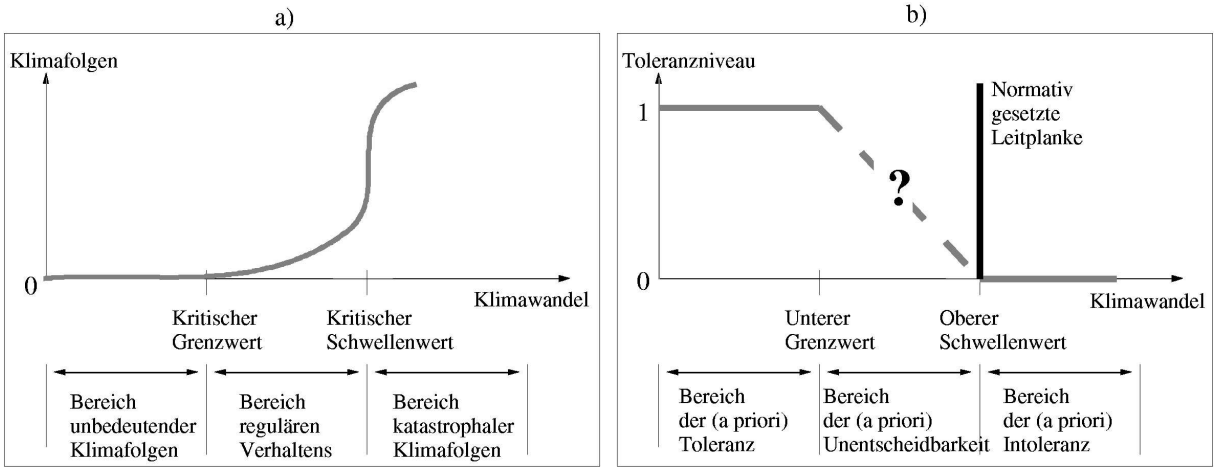

Abbildung 2: *a) Wissenschaftliche Perzeption des Zusammenhangs zwischen Klimawandel und Klimafolgen: "Klimawirkungsfunktion". b) Normative Wahrnehmung des Klimawandels bezüglich einer spezifischen Auswirkung. An einen Bereich der Intoleranz gegenüber dem Klimawandel (Toleranzniveau 0) schließt sich ein Bereich an, in dem a priori keine Entscheidung möglich ist (Toleranzniveau zwischen 0 und 1). Zusätzlich kann es noch einen Bereich der Toleranz (Toleranzniveau 1) geben. Zur Vereinfachung ist nur eine Dimension der Klimafolgen abgebildet, obwohl selbstverständlich alle relevanten Kategorien in einer multidimensionalen Weise berücksichtigt werden sollten. (Bruckner et al. 1999)*

Für die folgende Betrachtung zur Bestimmung von Leitplanken für Klimafolgen ist es hilfreich, zwei Typen systemischer Antworten auf den Klimawandel zu unterscheiden. Einige Systeme zeigen innerhalb plausibler Bereiche der relevanten klimatischen Variablen ein im wesentlichen „reguläres" Antwortverhalten, andere Systeme hingegen können durch diskontinuierliche oder „singuläre" Antwortfunktionen charakterisiert werden kann. Abbildung 2a zeigt eine Mischform dieser beiden Typen, wo ein System bei zunächst ein reguläres Verhalten aufweist, während es bei stärkerem Klimawandel zu einer singulären Antwort kommt.

Diese beiden Antwortkategorien werfen unterschiedliche Entscheidungsproblemen auf. Bei regulärem Antwortverhalten ist die Festlegung von Leitplanken im wesentlichen abhängig von der Wahrnehmung und Bewertung durch soziale Akteure. Dementsprechend besteht das soziale Entscheidungsproblem in der Festlegung des Niveaus, ab welchem die Auswirkungen des Klimawandels als gefährlich angesehen werden. Bei singulärem Antwortverhalten wird in der Regel ein Phasenübergang vorliegen, so dass das System beim Überschreiten eines Grenzwerts sein Verhalten qualitativ (und möglicherweise irreversibel) ändert. In solchen Fällen besteht das Problem in der Entscheidung, ob die Menschheit eine solche Schwelle überschreiten will, oder nicht.

Die Festlegung, welche Indikatoren zur Bestimmung der Leitplanken herangezogen werden, wird im Leitplankenansatz nur durch die Grenzen des Wissens begrenzt. Ebenso wenig gibt der Leitplankenansatz vor, an welchen Punkten Leitplanken gesetzt werden müssen. Die beiden oben genannten Typen des Antwortverhaltens lassen allerdings zwei komplementäre Strategien der Leitplankensetzung als besonders Erfolg versprechend erscheinen.

Die *Eingrenzungsstrategie* versucht, *kritische Schwellenwerte* (siehe Abb. 2a) des Klimawandels zu identifizieren, die zu großräumigen und irreversiblen Änderungen des Klimasystems führen (z. B. Zusammenbruch der thermohalinen Ozeanzirkulation, sich selbst verstärkender Treibhauseffekt).

Die *Ausweitungsstrategie* geht in entgegengesetzter Richtung vor, indem sie sich zunächst auf die besonders sensitiven Sektoren und Regionen konzentriert. Es wird also der *kritische Grenzwert* (siehe Abb. 2a) gesucht, unterhalb dessen keine signifikanten Auswirkungen zu erwarten sind. Ein Einhalten dieser Klimaleitplanke könnte jedoch so hohe Klimaschutzaufwendungen erfordern, dass die gleichzeitig zu beachtenden sozioökonomischen Leitplanken nicht mehr einzuhalten wären. In diesem Fall wären die zu beratenden sozialen Akteure gezwungen, ihre Festlegungen für die Leitplanken so lange zu modifizieren, bis diese miteinander kompatibel sind. Ein solches Vorgehen, das eigentlich unerwünschte Klimafolgen bewusst zulässt, macht den notwendigen politischen Entscheidungsprozess transparenter. Es wirft dadurch auch die Frage nach Unterstützung zur Anpassung an den Klimawandel und nach Kompensationen für nicht vermiedene Klimafolgen auf.

Klimapolitische Entscheidungsträger werden die normative Vorgabe von Leitplanken i. A. auf der Basis von Klimawirkungsfunktionen durchführen, sind aber nicht gezwungen, die Leitplanken einem der beiden in Abb. 2a explizit ausgewiesenen Werte (kritischer Grenz- bzw. Schwellenwert) gleichzusetzen. Eine allgemeinere Toleranzfunktion gegenüber dem Klimawandel ist in Abbildung 2b gezeigt. Auch hier ist zur Veranschaulichung nur eine Dimension des Klimawandels und der Klimafolgen abgebildet. In der Regel wird ein klimapolitischer Entscheidungsträger denjenigen Bereich des Klimawandels, in dem a priori als nicht tolerierbar angesehene Klimafolgen zu erwarten sind (Toleranzniveau 0 in Abb. 2b), in jedem Fall durch eine normativ gesetzte Leitplanke ausschließen wollen. Neben diesem Bereich der (a priori) Intoleranz existiert ein Bereich der Unentscheidbarkeit (nicht jedoch notwendigerweise der Indifferenz), der in Abb. 2b durch Toleranzgrade *zwischen* 0 und 1 charakterisiert ist. Hieran kann sich zusätzlich noch ein Bereich der (a priori) Toleranz anschließen, der z. B. moderate Klimafolgen umfasst, für die effektive Anpassungsmaßnahmen zur Verfügung stehen (Bruckner et al. 1999).

Nachdem ein Entscheidungsträger „seine“ Leitplanken definiert hat, wird in einer modellgestützten Analyse das Bündel der damit verträglichen Emissionspfade bestimmt. Die damit zusammenhängende inverse Bestimmung wichtiger Eigenschaften der Menge der zulässigen Emissionsminderungsstrategien kann im Rahmen der Theorie der Differentialinklusionen (mengenwertige Differentialgleichungen) formalisiert werden (Aubin & Cellina 1984; Kurzhanski & Vályi 1997). Im Gegensatz zu anderen „Integrated Assessment“-Ansätzen bestimmt der Leitplankenansatz also wesentliche Aspekte der Gesamtheit der mit den Leitplanken verträglichen Strategien und nicht nur einen einzigen Klimaschutzpfad. Es ist durchaus möglich, dass die modellgestützte Analyse keine mit den Leitplanken

verträglichen Emissionsminderungsstrategien ergibt. In diesem Fall wäre der Entscheidungsträger gezwungen, im Rahmen der zuvor erläuterten Ausweitungsstrategie die Leitplanken so lange zu verändern, bis sie miteinander kompatibel sind.

Durch Projektion des Bündels der zulässigen Klimaschutzstrategien auf die entsprechenden Teilräume des gesamten Zustandraums erhält man Emissions- bzw. Klimakorridore. Solche Korridore lassen sich als zweidimensionale Visualisierung *notwendiger* Bedingungen für akzeptable zukünftige Entwicklungen verstehen: Die Ränder eines solchen Korridors werden durch (gerade noch) zulässige Pfade bestimmt, wohingegen jeder Pfad, der den entsprechenden Korridor verlässt, mindestens eine der Leitplanken verletzt. Allerdings ist nicht jeder innerhalb des Korridors verlaufende Pfad automatisch zulässig. Analysen zur Zulässigkeit einzelner Pfade erfordern die Betrachtung der inneren Struktur des Korridors, die sich z. B. durch geeignete Parametrisierung der Emissionspfade erreichen lässt (vgl. Petschel-Held et al. 1999).

5. Implementierung des Leitplankenansatzes: Das integrierte ICLIPS-Modell

Um den Leitplankenansatz konkret als Instrument der Politikberatung anwenden zu können, wurde im ICLIPS-Projekt ein integriertes Modell des globalen Klimawandels entwickelt, das zur Beratung klimapolitischer Entscheidungsträger für eine Vielzahl von Fragen hinsichtlich der Umsetzung der Klimarahmenkonvention einsetzbar ist. Aufgrund des erheblichen Rechenaufwandes, der mit der Bestimmung der Gesamtheit aller zulässigen Klimaschutzstrategien verbunden ist, musste hierbei auf vereinfachte Modelle zurückgegriffen werden, die nummerisch effizient sind und das Verhalten von detaillierten Prozessmodellen dennoch im Wesentlichen wiedergeben können.

Zentraler Bestandteil des ICLIPS-Modells ist ein vereinfachtes **Klimamodell** (Bruckner et al. 2003; Hooss et al. 1999), welches durch die Modellierung des Kohlenstoffkreislaufs, der Atmosphärenchemie aller weiteren Treibhausgase sowie des globalen Klimasystems die Verbindung zwischen der Emission von Treibhausgasen und den daraus resultierenden Klimaänderungen herstellt.

Die Auswirkungen von Klimaänderungen auf relevante Systeme werden im ICLIPS-Modellverbund durch **Klimawirkungsfunktionen** (Füssel et al. 2001; Füssel & van Minnen 2001) repräsentiert. Diese Funktionen nehmen die von komplexen allgemeinen Zirkulationsmodellen prognostizierten Klimaänderungen einschließlich ihrer räumlichen und saisonalen Variabilität zum Ausgangspunkt, um deren vielfältige Auswirkungen auf verschiedenen klimasensitive Systeme zu untersuchen.

Die für das Klimaproblem relevanten Zeitskalen des gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Systems liegen überwiegend im Bereich von Jahrzehnten und sogar Jahrhunderten. Die Modellierung der Entwicklung des sozioökonomischen Systems über einen so langen Zeitraum ist offensichtlich mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Im integrierten ICLIPS-Modell wird ein ökonomisches **Wachstumsmodell** (Leimbach & Tóth 2003) eingesetzt, welches ein wesentliches Element des ökonomischen Entwicklungsprozesses, den Investitions- und Kapitalakkumulationszyklus, endogen erklärt. Auf der Basis exogener Annahmen zur

Bevölkerungsentwicklung und zur Entwicklung bestimmter Technologieparameter wird die ökonomische Entwicklung jeder untersuchten Region berechnet. Die Unterscheidung von 11 makroökonomischen Weltregionen erlaubt es einerseits, den regional unterschiedlichen Start- und Entwicklungsbedingungen Rechnung zu tragen und die sich aus den interregionalen Wechselbeziehungen ergebenden, wachstumsbestimmenden Einflüsse endogen abzubilden; andererseits können die verschiedenen Potenziale und Interessen hinsichtlich der Umsetzung von klimapolitischen Maßnahmen deutlich gemacht werden.

In das aggregierte Ökonomiemodell ist ein **Technologiemodul** integriert, welches die volkswirtschaftlichen Kosten von Emissionsreduktionen auf Grund von empirischen Daten zur Entwicklung von mehreren hundert Energietechnologien bestimmt. Darüber hinaus ist ein **Landnutzungsmodell** zur Ermittlung von landnutzungsbedingten Treibhausgasemissionen angekoppelt.

6. Exemplarische Anwendung des Leitplankenansatzes: Emissionskorridorberechnung für den WBGU

In diesem Abschnitt wird beispielhaft eine Anwendung des Leitplankenansatzes in der Beratung klimapolitischer Entscheidungsträger vorgestellt, für die eine Vorläuferversion des ICLIPS-Modells eingesetzt wurde. Die Einfachheit des Beispiels ermöglicht einen guten Einblick in mögliche Anwendungen des Leitplankenansatzes. Eine ausführlichere Präsentation von aktuelleren Ergebnissen des vollständig gekoppelten ICLIPS-Modells einschließlich einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich verschiedener Leitplanken findet sich z. B. in Tóth et al. (2002).

Das hier vorgestellte Beispiel entstammt einer Stellungnahme, die der Wissenschaftliche Beirat Globale Umweltveränderungen (WBGU) der Bundesregierung im Vorfeld der 3. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Kyoto veröffentlicht hat (WBGU 1997). Hierin griff der WBGU auf ein bereits früher definiertes „Klimafenster“ zurück, welches Änderungen der globalen Mitteltemperatur sowohl hinsichtlich des absoluten Ausmaßes als auch ihrer Geschwindigkeit beschränkt (WBGU 1995). Gemäß dieser Leitplanken wird eine absolute Temperaturänderung (bezogen auf den vorindustriellen Wert) von mehr als 2°C sowie eine Temperaturänderungsrate von mehr als 0.2°C pro Dekade unter Vorsorgegesichtspunkten als nicht mehr tolerierbar angesehen. Die Festlegung der Temperaturobergrenze orientierte sich dabei an der beobachteten Schwankungsbreite im jüngeren Quartär, also jenem erdgeschichtlichen Zeitalter, das unsere heutige Umwelt geprägt hat. Um unzumutbare Belastungen der Gesellschaft durch drastische Klimaschutzmaßnahmen zu vermeiden, wurde in dieser frühen Modellvariante, die noch kein ökonomisches Modul umfasste, die globale Emissionsreduktionsrate auf (sehr ambitionierte) 4% pro Jahr beschränkt. Als Obergrenze für die Emissionen sowie als Bezugsgröße zur Bestimmung von Vermeidungskosten wurde das IS92a-Szenario des IPCC als Referenzszenario gewählt. Darüber hinaus wurde angenommen, dass Emissionsminderungen aller energiebedingten Treibhausgase sowie von aerosolbildenden Substanzen gleichphasig erfolgen.

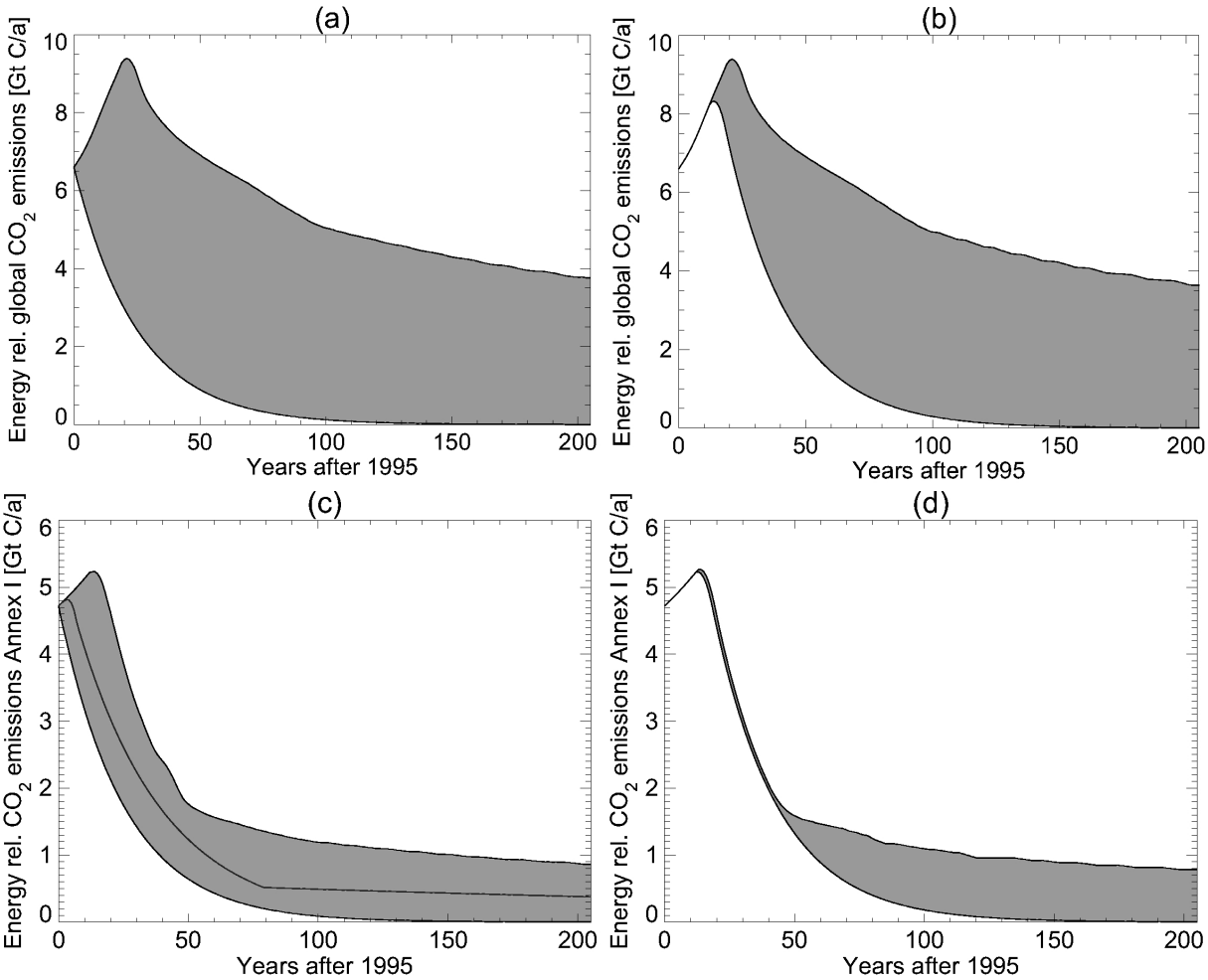

Abbildung 3: *Notwendige Emissionskorridore der Kohlendioxidemissionen bis ins Jahr 2200 (ausgehend vom Startjahr 1995). Jede Kurve, die eine bei den vorgegebenen Leitplanken zulässige Entwicklung der Emissionen darstellt, muß innerhalb des Korridors (schattierte Fläche) liegen.*

a: Globaler Korridor bei sofortigem Beginn einer Klimaschutzpolitik: Notwendiger Emissionskorridor der globalen Kohlendioxidemissionen.

b: Globaler Korridor bei Hinauszögern einer Klimaschutzpolitik: Der notwendige Emissionskorridor, der sich ergibt, wenn bis zum Jahr 2010 keine Maßnahmen zur Minderung der Emissionen ergriffen werden.

c: Annex-1-Korridor: Notwendiger Emissionskorridor der Emissionen aller Annex-1-Staaten, der sich ergibt, wenn den Entwicklungsländern so lange ein weiterer Anstieg der Emissionen zugebilligt wird, bis gleiche Pro-Kopf-Emissionen erreicht worden sind. Der innerhalb des Korridors eingezeichnete Emissionspfad stellt die vom WBGU empfohlene Emissionsminderungsstrategie dar.

d: Annex-1-Korridor bei Hinauszögern einer Klimaschutzpolitik: Notwendiger Emissionskorridor aller Annex-1-Staaten, der sich ergibt, wenn bis zum Jahr 2010 keine Maßnahmen zur Minderung der Emissionen eingeleitet werden und gleichzeitig den Entwicklungsländern so lange ein weiterer Anstieg der Emissionen zugebilligt wird, bis gleiche Pro-Kopf-Emissionen erreicht worden sind. (WBGU 1997)

Abbildung 3 zeigt verschiedene mit den Leitplanken verträgliche notwendige Korridore der Kohlendioxid-Emissionen für den Zeitraum von 1995 bis 2200. Es ist zunächst zu erkennen, dass zur Einhaltung der Leitplanken die globalen Treibhausgasemissionen langfristig erheblich vermindert werden müssen (a), und dass ein Abwarten von 15 Jahren einen geringen Einfluss auf den oberen Rand des *globalen* Emissionskorridors hat (b). Eine weitere Analyse beschäftigte sich mit der

Verteilung der Reduktionslasten auf verschiedene Länder. Motiviert durch das „Berliner Mandat“, welches 1995 auf der ersten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention beschlossen worden war, gestand der WBGU den nicht im Annex 1 der Klimarahmenkonvention aufgeführten Ländern („Entwicklungsländer”) so lange eine Emissionsentwicklung gemäß dem IS92a-Referenzszenario zu, bis diese Staatengruppe dieselben pro-Kopf-Emissionen aufweist wie die Länder in Annex 1 („Industrieländer”). Der sich aus dieser Festlegung ergebende Emissionskorridor für die Annex 1-Länder ist bereits recht eng (c). Ein Verfolgen des Referenzpfades für weitere 15 Jahre führt bei gleichzeitiger Beachtung dieser Gerechtigkeitsanforderung schließlich dazu, dass der zulässige Korridor nahezu verschwindet (d).

Es sei an dieser Stelle nochmals betont, dass es sich bei den in Abb. 3 gezeigten Korridoren um *notwendige* Emissionskorridore handelt. Dementsprechend ist jeder Pfad, der den Korridor verlässt, offensichtlich unzulässig, aber nicht jeder beliebige Pfad innerhalb eines Korridors ist per se zulässig. Insbesondere ist der obere Rand eines Korridors in der Regel *kein* zulässiger Pfad. Es handelt sich somit nicht um „sichere Emissionskorridore“.

7. Behandlung von Unsicherheiten im Leitplankenansatz: Ein Ausblick

Der Leitplankenansatz wurde bisher in seiner deterministischen Form dargestellt, die auf der Annahme beruht, dass die Beziehungen zwischen wirtschaftlicher Entwicklung, Treibhausgasemissionen, Klimawandel und seinen Auswirkungen eindeutig beschrieben werden können. Tatsächlich ist die Thematik des Klimawandels jedoch von vielfältigen Unsicherheiten geprägt. In diesem Abschnitt sollen daher verschiedene Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Rahmen des Leitplankenansatzes vorgestellt werden. Hierbei ist es hilfreich, zunächst drei Kategorien von Unsicherheit zu unterscheiden (Bruckner et al. 1999; Tóth et al. 2003):

1. *Zukunftsbezogene Unsicherheit* bezieht sich auf die Unsicherheit in der Vorhersage zukünftiger Entwicklungen (z. B. Veränderungen demographischer Parameter) und Ereignisse (z. B. technische Erfindungen). Diese Unsicherheiten werden sich bei Annäherung an den Vorhersagezeitpunkt in der Regel auflösen. Beispielsweise kann davon ausgegangen werden, dass die Treibhausgasemissionen des Jahres 2010 im Jahr 2009 gut vorhergesagt werden können und im Jahr 2011 mit annehmbarer Genauigkeit vorliegen werden.

2. *Politische Unsicherheit* bezieht sich auf Veränderungen in der gesellschaftlichen Wahrnehmung und Bewertung von Umweltrisiken sowie von Maßnahmen zum Schutz vor diesen. Solche Wertvorstellungen haben weit reichende Implikationen für die Beurteilung „nicht tolerierbarer“ Auswirkungen des Klimawandels oder „inakzeptabler“ Vorsorgekosten. Durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse über die Klimaproblematik und diesbetreffende Lösungsmöglichkeiten kann es prinzipiell zu fundamentalen Änderungen in den Zielen der Klimapolitik kommen.

3. *Wissenschaftliche Unsicherheit* bezieht sich auf die unzureichende Kenntnis bestimmter (naturwissenschaftlicher) Prozesse, beispielsweise in der

Atmosphärenchemie. Es ist davon auszugehen, dass diese Art von Unsicherheit durch weitere wissenschaftliche Forschung verringert werden kann.

Die Berücksichtigung zukunftsbezogener Unsicherheit ist generell problematisch und geschieht typischerweise durch Szenarienanalysen. Ähnliches gilt auch für die politische Unsicherheit. Ein großer Vorteil des Leitplankenansatzes besteht allerdings daran, dass er die Notwendigkeit von Werturteilen bei der Bewertung verschiedener Aspekte des Klimawandels ausdrücklich betont und diesen Aspekt somit der Diskussion zugänglich macht (Helm et al. 1999). Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse des ICLIPS-Modells hinsichtlich Variationen in verschiedenen Leitplanken werden in Tóth et al. (2002) vorgestellt.

Wir beschränken uns an dieser Stelle auf wissenschaftliche Unsicherheiten, die wiederum in drei Kategorien unterteilt werden können (Bruckner et al. 1999). Eine ausführliche Diskussion der Thematik findet sich auch in Jones (2000).

1. *Risiko* bedeutet, dass die Unsicherheit durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben werden kann, wie z. B. Veränderungen des Risikos von Überflutungen in Folge des Meeresspiegelanstiegs.

2. *Unsicherheit (im engeren Sinne)* bedeutet, dass der Bereich der Unsicherheit zwar begrenzt ist, die vorhandenen Informationen aber nicht ausreichen, um die Vergabe von Wahrscheinlichkeiten zu rechtfertigen. Dies betrifft beispielsweise die Klimasensitivität, d. h. die globale Erwärmung, welche bei einer Verdoppelung der Kohlendioxid-Konzentration zu erwarten ist. Für diesen Wert wird ein Bereich von 1,5 bis 4,5°C angenommen, ohne dass es bisher möglich wäre, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung anzugeben (IPCC 2001a).

3. *Unwissen* bedeutet, dass es nicht möglich ist, den Bereich der Unsicherheit überhaupt quantitativ anzugeben. So ist es beispielsweise denkbar, dass ab einem bestimmten Grad der globalen Erwärmung ein sich selbst verstärkenden Treibhauseffekt eintreten könnte. Bisher ist jedoch vollkommen unsicher, wie stark die Klimaänderung sein muss, damit es zu einem solchen Effekt kommt.

Risikoaspekte lassen sich unmittelbar in den Leitplankenansatz integrieren. Wenn für bestimmte Größen objektive oder allgemein akzeptierte subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilungen vorliegen, sollten diese in der Analyse berücksichtigt werden. So ist es beispielsweise möglich, Leitplanken zu definieren, welche die Eintretenswahrscheinlichkeit bestimmter Ereignisse begrenzen. Die Setzung dieser Wahrscheinlichkeit wäre dann Teil der normativen Entscheidung, die ein zu beratender Entscheidungsträger durchführen müsste.

Unsicherheit im engeren Sinne kann ebenso im Leitplankenansatz berücksichtigt werden. Falls keine näheren Informationen über mehr oder weniger wahrscheinliche Bereiche innerhalb eines Unsicherheitsintervalls vorliegen, müsste eine solche Analyse sicher stellen, dass die Leitplanken auch im ungünstigsten Fall nicht verletzt werden. Analysen, die keinerlei Annahmen bezüglich der Wirkung einer unsicheren Größe machen können, erfordern die Anwendung neuer Methoden der Möglichkeitstheorie, die derzeit im Rahmen der Theorie der Differentialinklusionen

entwickelt werden (Kurzhanski & Valyi, 1997). Eine generelle Anwendung des Leitplankenansatzes auf unsichere Parameter ist mit dem ICLIPS-Modell derzeit nicht möglich. Allerdings bietet die Bestimmung einer Menge von nicht a priori inakzeptablen Lösungen die Möglichkeit, unsicheres, nicht-quantifiziertes Wissen dennoch in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. Dies geschieht dann nicht mehr in der eigentlichen Modellanalyse, sondern in der Auswahl von präferierten Klimaschutzstrategien aus der zuvor vom Modell bestimmten Lösungsmenge (Bruckner et al. 1999).

Vollständiges Unwissen lässt sich naturgemäß in keinem entscheidungstheoretischen Ansatz sinnvoll berücksichtigen. Ein erster Schritt, sich dem Unwissen anzunähern, bestünde in der Bestimmung von „Grenzen des Unwissens“. Eine vorausschauende, auf dem Vorsorgeprinzip basierende Strategie würde dann diejenigen Bereiche des zukünftigen Klimawandels meiden, in denen katastrophale Entwicklungen möglich erscheinen. Paläoklimatische Erkenntnisse könnten hierbei eine erste Orientierungshilfe hinsichtlich „sicherer“ Klimazustände geben. Im Leitplankenansatz können „Grenzen des Unwissens“ unmittelbar berücksichtigt werden, indem an diesen Stellen Leitplanken definiert werden. Das zuvor vorgestellte „WBGU-Klimafenster“ beruhte im wesentlichen auf dieser Methode.

8. Schlussbemerkungen

Der Leitplankenansatz wurde mit der Zielsetzung entwickelt, das Vorsorgeprinzip auf den Klimawandel anzuwenden. Zentrales Element des Leitplankenansatzes ist es, unerwünschte Auswirkungen sowohl des Klimawandels als auch von Klimaschutzmaßnahmen durch normativ gesetzte Leitplanken zu begrenzen. In einer inversen Berechnung werden dann wichtige Eigenschaften der Gesamtheit der mit diesen Leitplanken verträglichen Klimaschutzstrategien bestimmt. Diese Vorgehensweise erlaubt eine weitest gehende Trennung von wissenschaftlicher Analyse und Werturteilen.

In seiner ursprünglichen Fassung geht der Leitplankenansatz davon aus, dass die wesentlichen Aspekte des Klimawandels und seiner Auswirkungen deterministisch beschrieben werden können. Realistische Analysen des Klimaproblems sollten jedoch die vielfältigen Unsicherheiten, die hierbei relevant sind, berücksichtigen. Im Gegensatz zu anderen entscheidungstheoretischen Ansätzen wie der Kosten-Nutzen-Analyse oder der Kosten-Effektivitäts-Analyse können manche Aspekte von Unsicherheit bereits in der deterministischen Version des Leitplankenansatzes berücksichtigt werden können. Andere Aspekte würden jedoch eine Weiterentwicklung des Konzeptes erfordern.

Aktuelle Forschungsarbeiten am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Berlin beschäftigen sich mit einer solchen konzeptionellen Weiterentwicklung des Leitplankenansatzes. Die Forschung betrifft zum einen die Fortpflanzung von Wahrscheinlichkeits- oder sogar Möglichkeitsverteilungen entlang der Wirkungskette des Klimawandels, um auf diese Weise den Leitplankenansatz auch im Fall größerer Unsicherheiten anwenden zu können. Zum anderen wird derzeit an der Entwicklung von Frühwarnindikatoren gearbeitet, welche die Annäherung an kritische Schwellwerte im Klimasystem

rechtzeitig anzeigen und so eine sequentielle Steuerung des Klimasystems ermöglichen würden.

9. Literatur

Alcamo, J. (Hrsg.) (1994): IMAGE 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change, Kluwer, Dordrecht.

Alcamo, J.; Kreileman, E. (1996): Emission Scenarios and Global Climate Protection. In: Global Environmental Change 6, S. 305-334.

Alcamo, J.; Kreileman, E.; Krol, M.; Leemans, R. ; Bollen, J.; van Minnen, J.; Schaeffer, M.; Toet, S.; de Vries, B. (1998): Global modelling of environmental change: an overview of IMAGE 2.1. In: Alcamo, J.; Leemans, R.; Kreileman, E. (Hrsg.): Global Change Scenarios of the 21st Century. Results from the IMAGE 2.1 Model. Pergamon, Oxford, S. 3-94.

Aubin, J.; Cellina, A. (1984): Differential Inclusions. Springer, Berlin.

Bruckner, T.; Petschel-Held, G.; Tóth, F. L.; Füssel, H.-M.; Helm, C.; Leimbach, M.; Schellnhuber H.-J. (1999): Climate Change Decision-Support and the Tolerable Windows Approach. In: Environmental Modeling and Assessment 4, S. 217-234.

Bruckner, T.; Hooss, G.; Füssel, H.-M.; Hasselmann, K. (2003): Climate System Modeling in the Framework of the Tolerable Windows Approach: The ICLIPS Climate Model. In: Climatic Change, im Druck.

FCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (1992): Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, New York, 9. Mai 1992, Bundesgesetzblatt Teil II, 1993, 1783.

Füssel, H.-M.; van Minnen, J.G. (2001): Climate impact response functions for terrestrial ecosystems. In: Integrated Assessment, 2, 4, S. 183-197.

Füssel, H.-M.; Toth, F.L.; van Minnen, J.G.; Kaspar, F. (2003): Climate impact response functions as impact tools in the tolerable windows approach. Climatic Change, im Druck.

Hasselmann, K.; Hasselmann, S.; Giering, R.; Ocana, V.; v. Storch, H. (1997): Sensitivity Study of Optimal CO_2 Emission Paths Using a Simplified Structural Integrated Assessment Model (SIAM). In: Climatic Change 37, S. 345-386.

Helm, C.; Bruckner, T.; Toth, F.L. (1999): Value Judgments and the Choice of Climate Protection Strategies. In: International Journal of Social Economics 26, S. 974-998.

Hooss, G.; Voss, R.; Hasselmann, K.; Maier-Reimer, E.; Joos, F. (1999): A nonlinear impulse response model of the coupled carbon cycle-ocean-atmosphere climate system. Report Nr. 290, MPI für Meteorologie, Hamburg.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996a): Climate Change 1995. The Science of Climate Change. The Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J. T.; Meira Filho, L. G.; Callendar, B. A.; Kattenberg, A.; Maskell, K. (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC (1996b): Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific and Technical Analysis. The Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change. Watson, R. T.; Zinyowera M. C.; Moss, R. H. (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC (2001a): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J. T.; Ding, Y.; Griggs, D. J.; Noguer, M.; van der Linden, P. J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C. A. (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC (2001b): Climate Change 2001: Impacts, Adaptations and Vulnerability. The Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. McCarthy, J. J.; Canziani, O.F.; Leary, N. A.; Dokken, D. J.; White, K. S. (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Jones, R. N. (2000): Managing Uncertainty in Climate Change Projections – Issues for Impact Assessment. In: Climatic Change 45, S. 403-419

Kurzhanski, A.; Valyi, I. (1997): Ellipsoidal Calculus for Estimation and Control. Birkhäuser, Basel, Switzerland.

Leimbach, M.; Toth, F. L. (2003): Economic Development and Emission Control over the Long Term: The ICLIPS Aggregated Economic Model. In: Climatic Change, im Druck.

Manne, A. S.; Mendelsohn, R.; Richels, R. G. (1995): MERGE - A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies. In: Energy Policy, 23, S. 17-34.

Morita, T.; Matsuoka, Y.; Kainuma, M.; Harasawa, H.; Kai, K. (1993): AIM- Asian-Pacific Integrated Model for Evaluating Policy Options to Reduce Greenhouse-Gas Emissions and Global Warming Impacts. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki, Japan.

Nordhaus, W. D.(1994): Managing the Global Commons: Economics of the greenhouse effect. Cambridge, MIT Press.

Petschel-Held, G.; Schellnhuber, H.-J.; Bruckner, T.; Toth, F. L.; Hasselmann, K. (1999): The Tolerable Windows Approach: Theoretical and Methodological Foundations. In: Climatic Change 41, S. 303-331.

Rotmans, J.; van Asselt, M. B. A.; deBruin, A. J.; den Ellen, M. G. J.; deGreff, J.; Hilderink, H.; Hoekstra, A. Y.; Janssen, M. A.; Koster, H. W.; Martens, W. J. M.; Niessen, L. W.; de Vries, H. J. M. (1994): Global Change and Sustainable Development: A Modeling Perspective for the Next Decade. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven.

Schellnhuber, H.-J.; Bruckner, T. (1998): Klimaschutz als Beispiel analytischer und politischer Komplexität: Leitplanken erforderlich, Spezial Ökologisch-ökonomische Komplexität, Ökologisches Wirtschaften 3/4, S. 10-12.

Toth, F. L.; Bruckner, T.; Füssel, H.-M.; Leimbach, M.; Petschel-Held, G.; Schellnhuber, H.-J. (2002): Exploring Options for Global Climate Policy: A New Analytical Framework. In: Environment 44, S. 22-34.

Toth, F. L.; Bruckner, T.; Füssel, H.-M.; Leimbach, M.; Petschel-Held, G. (2003): Integrated assessment of long-term climate policies. Part 2: Model results and uncertainty analysis. In: Climatic Change, im Druck.

WBGU: Szenario zur Ableitung globaler CO_2-Reduktionsziele und Umsetzungsstrategien, Stellungnahme aus Anlaß der 1. Vertragsstaatenkonferenz zum Rahmenübereinkommen über Klimaänderungen in Berlin, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Bremerhaven (1995).

WBGU: Ziele für den Klimaschutz, Stellungnahme zur dritten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Kyoto, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Bremerhaven (1997).