

**Deutscher Wetterdienst**



**Annalen der Meteorologie**

**36**

**Vorhersage: Wetter, Klima, Umwelt  
Symposium zur Einhundertfünfzigjahrfeier  
des Preußischen Meteorologischen Instituts  
16. und 17. Oktober 1997 in Berlin**

Zur Herstellung dieses Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

ISSN 0072-4122  
ISBN 3-88148-339-X

---

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, verboten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Deutschen Wetterdienstes in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm, oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Für den Inhalt sind die Autoren verantwortlich.

---

Herausgeber und Verlag:  
Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main

# VON DER KLIMAMODELLIERUNG ZUR ERDSYSTEMMODELLIERUNG: KONZEPTE UND ERSTE VERSUCHE

**Martin Claussen**

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Postfach 601203, 14412 Potsdam

sowie: Institut für Meteorologie, FU Berlin

e-mail: claussen@pik-potsdam.de

## EINLEITUNG

In den letzten Jahren wurden in der Gemeinschaft der Klimaforscher die Begriffe Klimasystemmodellierung und Erdsystemmodellierung populär. Die Klimasystemmodellierung ist mit der Klimamodellierung verwandt und beide Begriffe werden, so scheint es, synonym gebraucht. Der Begriff des Erdsystems, und damit der Erdsystemmodellierung, hingegen stammt ursprünglich aus der Geophysik der festen Erde, wird jedoch heute zunehmend auf die globale Umweltproblematik angewandt. Daneben wird aber auch mit den etwas moderneren Begriffen die konventionelle Klimaforschung euphemistisch umschrieben.

Im Folgenden möchte ich versuchen, die Begriffe Klimasystem- und Erdsystemmodellierung mit Leben zu füllen. Denn wenn sie nicht zum Jargon verkommen sollen, müssen sie sich deutlich von anderen abheben - im Sinne der Aristotelischen Vorstellung, "definitio fit per genus proximum et differentiam specificam". Daher möchte ich Beispiele aus der Klimasystem- und Erdsystemmodellierung vorstellen. Dabei soll deutlich werden, dass die eben genannten Begriffe, die sich auf die globale Beschreibung unserer Umwelt beziehen, tatsächlich sinnvoll voneinander getrennt werden können.

## KLIMA- UND KLIMASYSTEMMODELLIERUNG

### Das Klimasystem

Als *Klimamodellierung* wird die modelltheoretische Beschreibung des Klimas bezeichnet, das nach Hann (1908) oft als "Gesamtheit der meteorologischen Erscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an irgend einer Stelle der Erdoberfläche kennzeichnen", definiert wird. Das Klima wird jedoch nicht allein durch Vorgänge bestimmt, die sich in der Atmosphäre abspielen, sondern es wird auch durch die Wechselwirkung der Atmosphäre mit den anderen Komponenten des Klimasystems beeinflusst. Neben der Atmosphäre umfasst das Klimasystem den Ozean (die Hauptkomponente der Hydrosphäre), die terrestrische und marine Biosphäre, die obere Erdschicht (die Pedosphäre), die Eismassen (die Hauptmasse der Kryosphäre) sowie, wenn man über die vielen Jahrtausende und Jahrmillionen der Ko-evolution von Geosphäre und Biosphäre blickt, den Erdmantel. Sämtliche Klimauntersysteme sind über den Energiekreislauf, den Wasserkreislauf, den Stoffkreisläufen und den Impulskreislauf verbunden. Daher muss das Klima über den Zustand des Klimasystems definiert werden.

In diesem Sinne dürfte es keinen Unterschied zwischen *Klimamodellierung* und *Klimasystemmodellierung* geben. Im Sprachgebrauch der Klimamodellierer aber scheint die Verwendung der Begriffe eine Funktion der Komplexität der Modelle zu sein. Ein Zirkulationsmodell der Atmosphäre oder des Ozeans, selbst ein gekoppeltes Atmosphäre-Ozean-Modell wird kaum als Klimasystemmodell bezeichnet. Wenn jedoch ein Modell der terrestrischen Biosphäre hinzugefügt wird, wird es schon so genannt - z.B. hat das NCAR (National Center of Atmospheric Research in

Boulder, Colorado) sich den Namen CSM (Climate System Model) für ein gekoppeltes Atmosphäre-Ozean-Vegetation-Modell reserviert. Nun wäre es sicher wenig sinnvoll, Klima- und Klimasystemmodelle nach technischen Kriterien, wie etwa der Anzahl der Programmzeilen zu unterscheiden. Daher möchte ich vorschlagen, unabhängig von der Komplexität der Modelle, *Klimamodelle* als allgemeinen Oberbegriff zu verstehen und den Begriff *Klimasystemmodelle* für die Klimamodelle zu reservieren, die hauptsächlich zu dem Zweck formuliert werden, die Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Komponenten des Klimasystems -mindestens der Atmosphäre, des Ozeans und der Biosphäre - zu beschreiben.

Klimasystemmodelle müssen über lange Zeiträume integriert werden können, da die einzelnen Untersysteme des Klimas unterschiedlich träge sind. Die Atmosphäre hat einen einmal angenommenen Zustand meist schon nach etwa (größenordnungsmäßig) 10 Tagen vergessen. Betrachtet man allerdings auch die Wasserspeicherung im oberen Erdreich, so wächst das Gedächtnis des Systems Atmosphäre-Pedosphäre auf gut 1 Jahr. Die obere, einige hundert Meter mächtige Schicht des Ozeans, die sogenannte Mischungsschicht, reagiert auf Änderungen im Bereich von Wochen und Monaten, während es einige  $10^3$  Jahre dauert, den tiefen Ozean umzuwälzen. Inlandeis und Gletscher haben ein noch längeres Gedächtnis von einigen  $10^4$  bis  $10^5$  Jahren. Die Vegetation ist eine besonders komplexe Größe im Klimasystem. Die physiologischen Prozesse wie Respiration und Assimilation reagieren auf meteorologische Änderungen innerhalb von Minuten. Pflanzengemeinschaften können ihre Struktur im Laufe von 30 bis 150 Jahren ändern, während das Einwandern von anderen Pflanzengemeinschaften sich in einem Zeitrahmen von etwa 300 bis 1500 Jahren abspielt. Die Entwicklung des Kohlenstoffkreislauf hängt unter anderem von der Verwitterung des Gesteins und tektonischer Aktivität ab, betrifft also Zeitskalen von  $10^6$ -  $10^8$  Jahren.

Am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung wird zur Zeit ein Klimasystemmodell entwickelt, mit dem ein Eiszeitzyklus von etwa 100.000 Jahren simuliert werden soll. Dies würde zur Zeit knapp einen Monat Rechenzeit auf einem Prozessor der IBM SP2 beanspruchen. Auch dieses Modell kann also nicht zur Untersuchung der langfristigen Ko-evolution zwischen Geosphäre und Biosphäre eingesetzt werden. Hierzu wird man sich in näherer Zukunft konzeptioneller Modelle bedienen.

Als Beispiel für die konzeptionelle Modellierung der Wechselwirkung zwischen Geosphäre und Biosphäre auf sehr langen Zeitskalen möchte ich das so genannte "daisy world model" - "Gänseblümchenmodell" - von Lovelock und Watson (1983) vorstellen, wobei ich auf die mathematischen Details verzichte. Danach werde ich Beispiele für die Analyse von Instabilitäten im Klimasystem diskutieren.

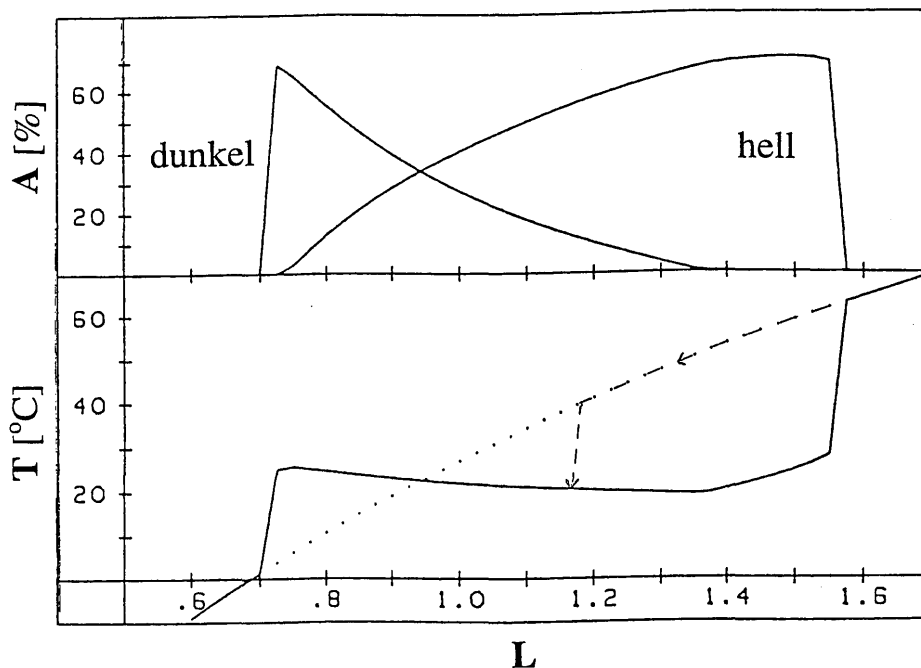
### Das "Gänseblümchenmodell"

Das "Gänseblümchenmodell" veranschaulicht die von Lovelock formulierte, so genannte Gaia-Hypothese, nach der die Wechselwirkung zwischen Biosphäre und Geosphäre ausgeglichene, für das Leben auf der Erde optimale Bedingungen schafft. Diese Wechselwirkung ist nicht als teleologischer, sondern lediglich als biogeophysikalischer Prozess zu verstehen.

Wir stellen uns einen Planeten vor, der nur von hellen und dunklen Gänseblümchen bewohnt wird. Die Gänseblümchen gedeihen am besten bei einer Temperatur von etwa  $20^{\circ}\text{C}$ . Bei Temperaturen oberhalb von etwa  $40^{\circ}\text{C}$  und unterhalb von etwa  $0^{\circ}\text{C}$  können sie nicht existieren. Beide Arten von Gänseblümchen haben eine natürliche Sterberate, so dass im Laufe der Zeit helle Blümchen dunkle ersetzen können und umgekehrt. Die Evolution der Gänseblümchenwelt wird durch eine externe Energiequelle, die Sonne, angetrieben. Der Unterschied zwischen den hellen und dunklen Gänseblümchen besteht darin, dass die dunklen mehr Sonnenlicht absorbieren als der unbewachsene Planet und die hellen Blümchen und somit zu einer lokalen Erwärmung führen. Die hellen Gänseblümchen reflektieren im Vergleich zu den dunklen Pflanzen und dem unbewachsenen Planeten die Sonnenstrahlung stärker und kühlen somit das Ökosystem.

Nehmen wir an, dass in der Modellwelt die Leuchtkraft der Sonne im Laufe der Zeit zunimmt. (Auch

in unserer Welt ist die Leuchtkraft der Sonne heute mindestens 30% stärker als zu Beginn des Lebens auf der Erde vor etwa 3.2 Milliarden Jahren.) Irgendwann im Laufe der Geschichte wird der noch kahle Planet so warm sein, dass Leben existieren kann. In diesem Moment ändert sich die Temperatur des Ökosystems, und es stellt sich die für das Wachstum der Blümchen optimale Temperatur ein. Nimmt die Intensität der Sonnenstrahlung im Laufe der Zeit weiter zu, so verändert sich das Spektrum der Gänseblümchen, indem zunehmend weiße Blümchen wachsen. Schließlich bleiben nur noch die weißen übrig, durch deren Existenz die Temperatur des Ökosystems unter der des kahlen, für das Leben der Blümchen zu heißen Planeten gehalten wird. Erreicht die Sonnenstrahlung einen kritischen Schwellenwert, so bricht das Ökosystem zusammen (siehe Abb.1).



**Abb.1:** Änderung der Temperatur und der Artenvielfalt der Gänseblümchenwelt als Funktion der (relativen) Leuchtkraft der Sonne. Oberer Teil: mit dunklen und hellen Gänseblümchen bedeckte relative Fläche A. Unterer Teil: Temperatur T des bewachsenen Planeten (durchgezogene Linie) sowie des unbewachsenen Planeten (gepunktete Linie). Die gestrichelte Linie zeigt die Temperatur des zunächst unbewachsenen, dann rekolonisierten Planeten für den Fall, dass nach einer Überhitzung des Planeten die Leuchtkraft der Sonne heruntergefahren wird.

Vermutlich bietet das Modell der Gänseblümchenwelt die einfachste Beschreibung einer biogeophysikalischen Wechselwirkung, durch die die Temperatur des Ökosystems Erde bei sich ändernden äußeren Randbedingungen auf einen, wie aus paläogeologischen Befunden rekonstruiert, für das Leben auf der Erde hinreichend konstanten Wert reguliert wird - eine Eigenschaft die im Allgemeinen als Homöostase oder Homöothermie bezeichnet wird.

Ob das Paradigma der Gänseblümchenwelt tatsächlich für die Erde gilt, ist nicht allgemein akzeptiert. Konkurrierende Modelle nehmen an, dass sich das Leben auf der Erde nur entwickeln konnte, weil geochemische Prozesse die Erde zufälligerweise bewohnbar gestalteten. Walker et al. (1981) vermuten, dass der Atmosphäre durch die (anorganische) Verwitterung von silikatreichen Oberflächengesteinen  $\text{CO}_2$  entzogen wurde, ein Prozess, der der Aufheizung der Erdatmosphäre auf Grund der zunehmenden Leuchtkraft der Sonne entgegenwirkt. Auch Budyko et al. (1988) nehmen an, dass die Temperatur des Ökosystems Erde im Wesentlichen durch zwei voneinander unabhängige abiotische Faktoren bestimmt wird: Die zunehmende Intensität der Sonnenstrahlung und die langsam abnehmende Ausgasung von  $\text{CO}_2$  aus dem Inneren der Erde. Bis zur Kreidezeit, so Budyko und andere, hielten sich zufälliger- und für das Ökosystem Erde glücklicherweise beide Prozesse die Waage. Gegen Ende der Kreidezeit, vor etwa 100 Millionen Jahren, führte eine abrupte Abnahme des Ausgasens zu einer deutlichen Abkühlung der Erde. Wäre das Ausgasen noch ein paar Millionen Jahre weiter

unvermindert stark zurückgegangen, so hätte dies zu einer vollständigen Vereisung der Erde führen können.

Ein weiterer augenscheinlicher Unterschied zwischen der Modellwelt der Gänseblümchen und der Erde besteht darin, dass es im Gegensatz zur kontinuierlichen Entwicklung der Gänseblümchenwelt auf der Erde zahlreiche katastrophale Einbrüche der Artenvielfalt gab (Budyko et al., 1988, Crowley und North, 1989; siehe Abb.2). Manche dieser Einbrüche, wie vermutlich das Sterben der Dinosaurier während des Wechsels von der Kreidezeit zum Tertiär vor circa 64 Millionen Jahren, lassen sich durch einen Asteroidenaufprall, also zufällige externe Einwirkungen, erklären. Daneben besteht aber auch die Möglichkeit, dass das Klimasystem auf Grund der nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen seinen verschiedenen Komponenten Ozean, Atmosphäre, Vegetation und Eismassen von sich aus zu raschen Umschwüngen neigt. Dies wird anhand folgender Beispiele verdeutlicht.

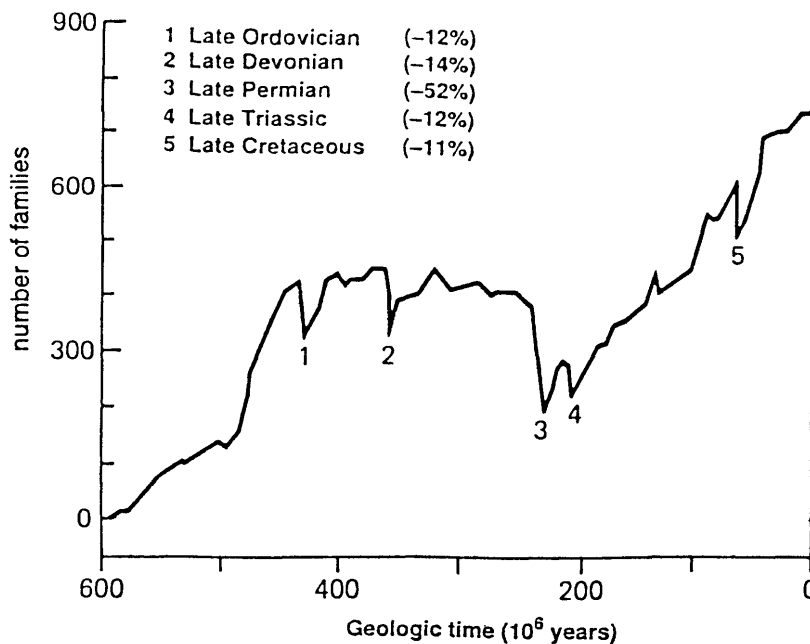
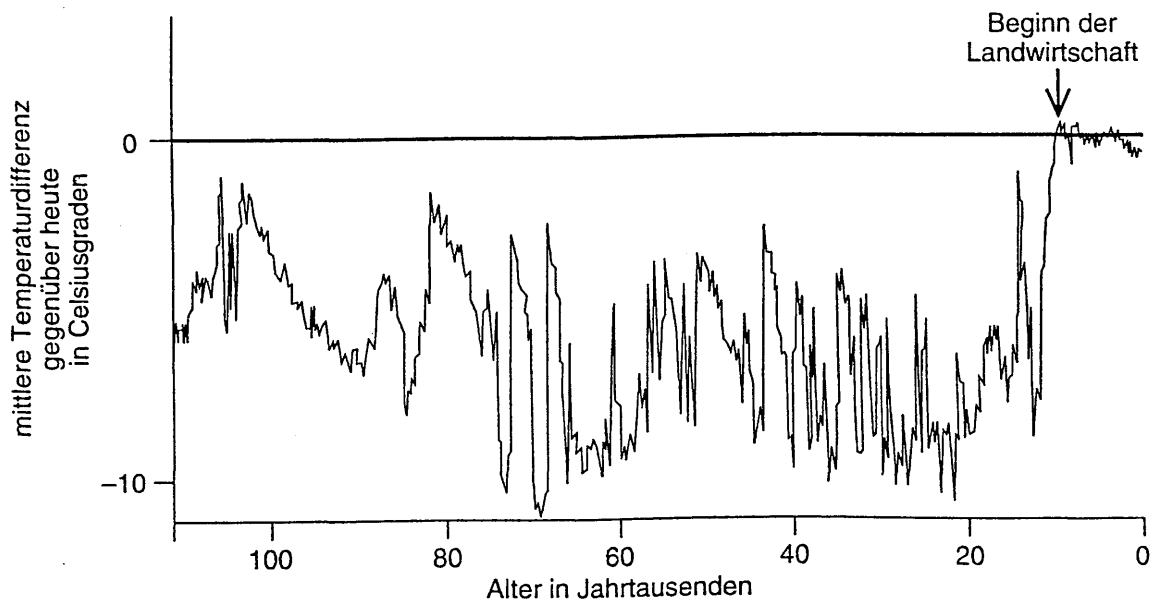


Abb.2: Anzahl der Familien mariner Organismen während der letzten 600 Millionen Jahre. Die Zahlen 1 - 5 kennzeichnen Perioden massiven Artensterbens. (Quelle: Budyko et al. (1988; mit Änderungen)

### Klimakapriolen

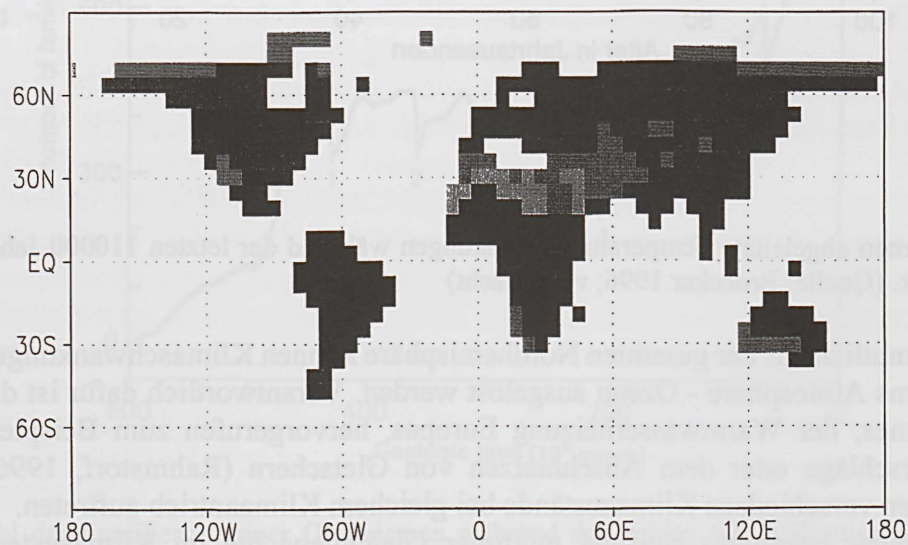
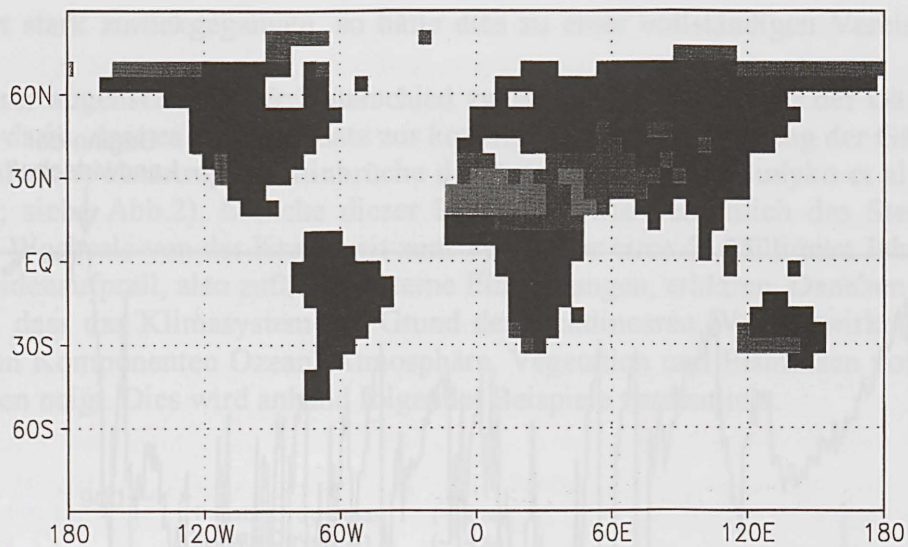
Die nichtlineare Wechselwirkung der untereinander offenen Klimaundersysteme sowie deren unterschiedlich langen Gedächtniszeiten führt zu einer internen Variabilität des Klimasystem und der Möglichkeit, dass das Klimasystem unterschiedliche Zustände annehmen kann, obwohl der äußere Antrieb, z.B. die Leuchtkraft der Sonne, sich nicht ändert - eine Eigenschaft, die von Lorenz (1968) als Fast-Intransitivität des Systems bezeichnet wird. Theoretische Studien mit einfachen so genannten Energiebilanzmodellen (siehe z.B. Budyko, 1969) zeigen, dass es unter heutigen Bedingungen der Sonneneinstrahlung prinzipiell drei verschiedene Zustände der Eisbedeckung der Erde geben könnte: die heute beobachtete, nahezu eisfreie Erde, eine zu gut einem Drittel mit Eis bedeckte Erde, sowie eine völlig vereiste Erde. Weitere Rechnungen lassen die Vermutung zu, dass nur die völlig eisbedeckte Erde einen absolut stabilen Gleichgewichtszustand darstellt, während eine teilweise mit Eis bedeckte Erde bei kleinsten Klimaschwankungen mit Eis überzogen wird (siehe dazu als Übersicht North et al., 1981). Der heutige, nahezu eisfreie Zustand ist relativ stabil. Vermutet wird, dass die starken Klimaschwankungen, oder "Klimakapriolen", während der letzten Vereisung, der Weichsel- oder Würmeiszeit (siehe Abb.3), Ausdruck der Bistabilität des Klimasystems sein könnte (Crowley und North, 1991).



**Abb.3:** Aus Eisbohrkernen abgeleitete Temperaturschwankungen während der letzten 110000 Jahre im Bereich Grönland / Nordatlantik. (Quelle: Broecker 1996; vereinfacht)

In Europa und vermutlich auf der gesamten Nordhemisphäre können Klimaschwankungen durch eine Instabilität des Systems Atmosphäre - Ozean ausgelöst werden. Verantwortlich dafür ist das Versiegen des Nordatlantikstromes, der Warmwasserheizung Europas, hervorgerufen zum Beispiel durch eine Zunahme der Niederschläge oder dem Abschmelzen von Gletschern (Rahmstorf, 1996). Auch bei diesem Prozess können verschiedene Klimazustände bei gleichem Klimaantrieb auftreten.

Ein weiteres, weniger bekanntes Beispiel multipler Gleichgewichte im Klimasystem bietet das System Atmosphäre-Vegetation. Unter heutigen Bedingungen der Sonneneinstrahlung und der Meerestemperaturen sind nach theoretischen Studien (Claussen, 1997) zwei stabile Zustände möglich. Der eine wird durch die heutige Vegetationsverteilung definiert, der andere durch eine um mehrere hundert Kilometer nach Norden verschobene Sahelzone und ein damit verbundenes humideres Klima in Nordafrika und Zentralostasien (siehe Abb.4). Neuere Rechnungen (Petoukhov, Brovkin, Claussen, Ganopolski - in Vorbereitung) zeigen, dass im frühen Holozän nur die "grüne" Sahara als Gleichgewichtslösung möglich ist. Vor 6000 Jahren muss dann ein Umbruch im System Vegetation-Atmosphäre erfolgt sein, dadurch dass ein zweiter Attraktor auftritt - die "aride" Sahara. Weitere 2000 Jahre später wird der letztere Attraktor global stabil. Das bedeutet, dass, selbst wenn die Sahara mit Vegetation bedeckt gewesen war, größere Schwankungen im Niederschlag das System in den ariden Zustand "gezogen" haben können. Das Bild einer grünen Sahara während des mittleren Holozäns sowie der vermutlich plötzliche Umschwung von einer grünen in eine aride Sahara stimmt im Großen und Ganzen mit paläontologischen Befunden überein. Dieser Zustand der ariden Sahara dauert bis heute an, könnte sich aber in einem Treibhausklima zugunsten des "grünen" Zustandes ändern.



**Abb.4:** Mit einem gekoppelten Atmosphäre-Biom-Modell berechneten Vegetationszonen im gegenwärtigen Klima. a) Das Modell wurde mit den heutigen Vegetationszonen gestartet. b) Das Modell wurde mit einer anomalen Verteilung der Vegetationszonen gestartet, bei der die tropischen Vegetationszonen mit den subtropischen Wüsten vertauscht wurden. Dunkle Flächen bedeuten Waldbiome, dunkelgraue Gras- und Steppenlandschaften. Graue Flächen kennzeichnen Wüstengebiete, hellgraue Sandwüsten und helle Flächen Inlandeis. (Nach Claussen, 1997)

Die letzteren Beispiele belegen, dass die Modellierung von Instabilitäten des Klimasystems nicht auf die Beschreibung der innerhalb kurzer Zeitspannen auftretenden Prozesse der Instabilität beschränkt sein darf. Da der Zustand des Klimasystems von seiner Entwicklungsgeschichte abhängt, muss die Entwicklung des Systems betrachtet werden. Dies ist im Allgemeinen mit komplexen Klimamodellen wegen des hohen Rechenaufwandes nicht möglich.



## ERDSYSTEMMODELLIERUNG

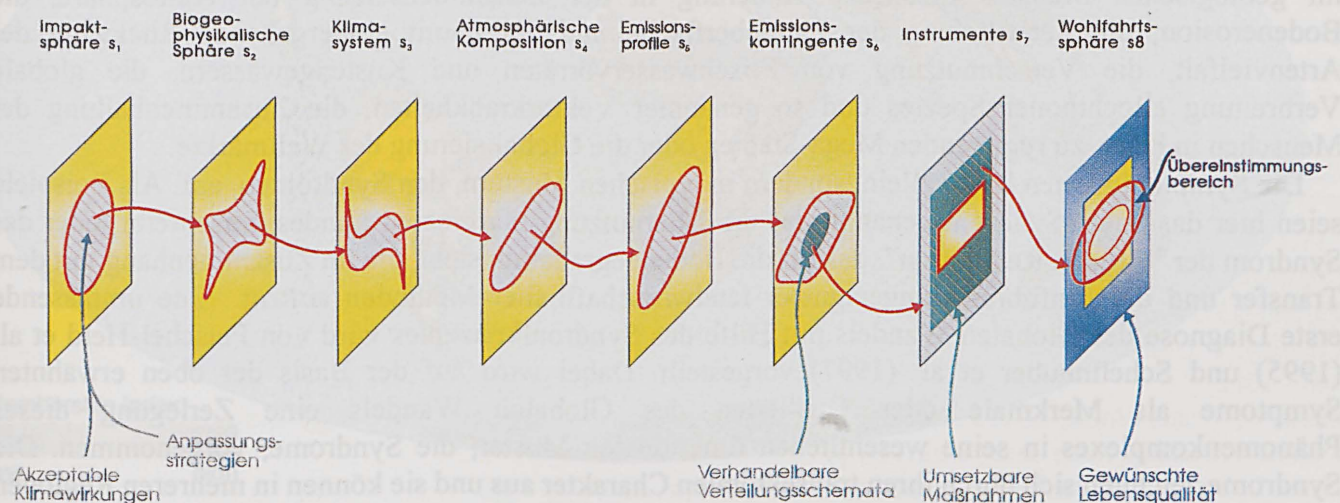
Der Begriff der Erdsystemmodellierung ist, wie bereits angedeutet, nicht klar umrissen. Daher möchte ich hier - ad hoc - Erdsystemmodellierung als die Wissenschaft definieren, die sich mit der Wechselwirkung zwischen der Anthroposphäre und dem Klimasystem befasst. Oft wird in diesem Zusammenhang das Klimasystem als Natur- oder Ökosphäre bezeichnet. Die Anthroposphäre umfasst das kulturelle und sozio-ökonomische Wirken des Menschen. Im Prinzip liesse sich der Mensch auch der Biosphäre und damit der Natursphäre (oder dem Klimasystem) zuordnen, aber nur insofern als er als thermodynamische Größe betrachtet werden kann - und dies schließt die kulturellen und psychosozialen Aspekte im Allgemeinen aus. In diesem Sinne können Klima- und Klimasystemmodelle als Untermenge der Erdsystemmodelle verstanden werden, also als Modelle, in denen der Einfluss des Menschen auf das Ökosystem Erde lediglich als Randbedingung formuliert und nicht interaktiv berechnet wird.

Im Folgenden möchte ich zwei Ansätze zur Erdsystemmodellierung vorstellen, um den Unterschied zwischen Erdsystem- und Klimasystemmodellierung hervorzuheben.

### Integrierte Modelle: Das Projekt ICLIPS

Im Zentrum des ICLIPS-Projekt (Integrated Assessment of Climate Protection Strategies) steht die Weiterentwicklung des so genannten "Fensteransatzes" (oder auch Leitplankenansatz oder Tolerable Windows Approach) - im Folgenden TWA abgekürzt, der vom Wissenschaftlichen Beirat "Globale Umweltveränderungen" der Bundesregierung anlässlich des Sondergutachtens zur 1. Vertragsstaatenkonferenz 1995 in Berlin vorgeschlagen wurde.

Unter Berücksichtigung der Folgen von Klimaänderungen für Mensch und Natur wird zunächst ein "Fenster" tolerierbarer künftiger Klimaentwicklungen vorgegeben. Darauf aufbauend werden diejenigen globalen Emissionsprofile für Treibhausgasemissionen berechnet, welche einen Verbleib in diesem Fenster sicherstellen (siehe Abb. 5). Auf diese Weise lassen sich unmittelbar Mindestanforderungen an eine weltweite "Klimaschutz"strategie ableiten. Durch die Vorgabe weiterer Fenster im sozio-ökonomischen Bereich (wie z.B. akzeptable Emissionsminderungsinstrumente, politisch durchsetzbare Quoten für Emissionsrechte in den einzelnen Ländern), lässt sich die Fülle der Emissionspfade einengen. Am Ende kann dann die Auswahl eines bestimmten Emissionspfades stehen, der allen normativ gesetzten Restriktionen genügt, zusätzlich aber hinsichtlich bestimmter Kriterien (z.B. Kosten der Emissionsminderung) als optimal anzusehen ist.



**Abb.5:** Struktur des so genannten Fensteransatzes im ICLIPS-Projekt. Erläuterung siehe Text. (Quelle: Toth et al, 1997)

Eine weiteres Ziel dieser Methode besteht darin, nicht nur einen kostenoptimalen Pfad zu finden, sondern die Gesamtheit aller zulässigen Emissionspfade zu ergründen, die mit den normativ gesetzten Fenstern vereinbar sind. Letztere Aufgabe erfordert die Entwicklung einer vollkommen neuen konzeptionellen Grundlage einschließlich entsprechender mathematischer Methoden wie der noch sehr jungen Theorie der Differentialinklusionen, d.h. der Theorie der mengenwertigen Differentialgleichungen

Die Projektionen des durch die Gesamtheit aller zulässigen Emissionspfade gebildeten Tubus - in der Mathematik als "funnel" bezeichnet - auf die verschiedenen Teilräume führt zu so genannten Emissions- bzw. Klimakorridoren. Diese lassen sich als notwendige Bedingung verstehen, in dem Sinne, dass jeder zulässige Emissionspfad in den entsprechenden Korridoren liegen muss; aber nicht jeder Pfad, der in die Korridore eingezeichnet werden kann, ist automatisch zulässig.

Ein anschauliches Beispiel wurde von Toth et al. (1997) vorgestellt, bei dem das tolerierbare "Klimafenster" durch eine maximale Erhöhung der globalen bodennahen Temperatur von 2°C und eine maximale Steigerung dieser Temperatur von 0.2°C pro Dekade aufgespannt wird. Soll eine Reduktionsrate für Treibhausgase von 10% pro Jahr nicht überschritten werden, so muss mit Emissionsreduktionsmaßnahmen spätestens im Jahre 2020 begonnen werden, wenn ein Verbleiben im Klimafenster gesichert sein soll. Möchte man aber eine weniger drastische maximale Reduktionsrate von 2% pro Jahr einhalten, so müssen die Treibhausgasemissionen bereits spätestens nach 15 Jahren reduziert werden. In jedem Fall sollten die Treibhausgas-emissionen langfristig auf einen Wert von nahezu Null reduziert werden.

Bei dieser Methode der integrierten Modellierung wird davon ausgegangen, dass sämtliche Zustände der beteiligten Systeme, wie Klima, Ökonomie, politische Maßnahmen und soziale Belange, durch Zustandsvariablen und Zustandgleichungen mathematisch beschrieben werden können. Dies gilt aber nicht für sämtliche Bereiche der Anthroposphäre. Außerdem sind viele Daten, die das Erdsystem beschreiben eher qualitativer, nicht quantitativer Natur. Dies wird bei dem so genannten Syndromansatz berücksichtigt.

#### Ein systemarerer Ansatz: Syndrome

Die exponentiell anwachsende Bevölkerung der Erde führt zu Änderungen im Erdsystem, die zusammenfassend als "Globaler Wandel" bezeichnet werden. Im Prinzip kann man den Globalen Wandel als eine Krise bezeichnen, die sich, ähnlich wie bei einer Störung des menschlichen Organismus, aus einer Reihe von Symptomen zusammensetzt. Beispiele für solche Symptome sind die im geologischen Maßstab drastische Änderung in der Zusammensetzung der Atmosphäre, die Bodenerosion, die Zersiedelung der Landoberfläche und der damit einhergehende Rückgang der Artenvielfalt, die Verschmutzung von Frischwasservorräten und Küstengewässern, die globale Verbreitung allochthoner Spezies und so genannter Vektorkrankheiten, die Zusammenballung der Menschen in kaum zu regierenden Mega-Städten oder die Globalisierung der Weltmärkte.

Die Symptome treten kaum allein, sondern in typischen Mustern, den Syndromen, auf. Als Beispiele seien hier das Sahel-Syndrom genannt, das die Übernutzung marginalen Landes umschreibt, oder das Syndrom der "Grünen Revolution", das für die Bodendegradation steht, die im Zusammenhang mit dem Transfer und der Einführung ungeeigneter landwirtschaftlicher Methoden auftritt. Eine umfassende erste Diagnose des Globalen Wandels mit Hilfe des Syndromkonzeptes wird von Petschel-Held et al. (1995) und Schellnhuber et al. (1997) vorgestellt. Dabei wird auf der Basis der oben erwähnten Symptome als Merkmale oder Qualitäten des Globalen Wandels eine Zerlegung dieses Phänomenkomplexes in seine wesentlichen funktionalen Muster, die Syndrome, vorgenommen. Die Syndrome zeichnen sich durch ihren transektoralen Charakter aus und sie können in mehreren Regionen der Erde auftreten. Durch eine geeignete Datenanalyse entsteht ein globaler Fleckenteppich der Regionen, in denen ein Syndrom bereits auftritt oder zumindest eine Neigung, eine Disposition, dafür besteht. Somit erlaubt das Syndromkonzept eine schwache synoptische Prognose der Dynamik des

## Globalen Wandels.

Als Beispiel für ein Syndrom soll hier das so genannte Sahel-Syndrom kurz erläutert werden, das "typischerweise" in der afrikanischen Sahel-Zone auftritt. Die dort stattfindende Bodenerosion hat recht wenig mit der Bodendegradation im Industriedreieck Leipzig-Halle-Bitterfeld oder der mit den berühmten Sandstürmen einhergehende Winderosion im mittleren Westen der Vereinigten Staaten der 30er Jahre gemein. Dies gilt nicht nur für die an diesem Syndrom beteiligten natürlichen Prozesse, sondern insbesondere auch für die anthropogenen Ursachen und Folgen. In der Sahel-Zone sieht sich die zumeist arme Landbevölkerung durch rechtliche, ökonomische oder soziale Randbedingungen gezwungen, auf Grenzertragsböden auszuweichen, was unter den gegebenen Bedingungen sehr häufig zu einer Übernutzung der Böden führt. Wind- und Wassererosion sind die meist unausweichliche Folge.

Die modelltheoretische Beschreibung dieser Vorgänge mit Hilfe der klassischen quantitativen Systemanalyse stößt auf erhebliche Probleme, da sich manche Prozesse nicht quantifizieren lassen. Hier werden neue Wege über eine unscharfe, qualitative und regelbasierte Modellierung mit Hilfe jeweiliger Experten an, wie zum Beispiel Fuzzy-Logik und neuronale Netze. Für das Sahel-Syndrom werden als quantitative Ausgangsgrößen die Nettoprimärproduktion der natürlichen Vegetation, Aridität, Bodenfruchtbarkeit, Hangneigung, Oberflächenwasserverfügbarkeit, Brennholzverbrauch und Nationale Nahrungsmittelbilanz benutzt. Diese Daten werden mit Hilfe so genannter Zugehörigkeitsfunktionen in Wahrscheinlichkeitswerte für unscharfe logische Aussagen übersetzt. Das Regelwerk der Fuzzy-Logik wird dann genutzt, um die in einem Entscheidungsbaum enthaltenen logischen Verknüpfungen zwischen den Einzelaussagen auszuwerten und so einen Indikator als Möglichkeitswert, die Disposition, einer Region für das Sahel-Syndrom zu berechnen (siehe Cassel-Gintz et al., 1997). Die Dispositionsanalyse zeigt, dass das Sahel-Syndrom nicht nur in der Sahel-Zone auftreten kann. Aufgrund der naturräumlichen Bedingungen sind nahezu sämtliche subtropischen Trockengebieten sowie die hohen Breiten gefährdet. Sozioökonomische Faktoren führen dagegen auf einen krassen Unterschied in der Disposition zwischen den Industrienationen und den Ländern der dritten Welt (siehe Abb.6). In der Tat ist die globale Verbreitung der Disposition gegenüber einem Syndrom typisch für ein Syndrom. Syndrome würden nicht als solche bezeichnet, wären sie nur von lokaler Bedeutung.

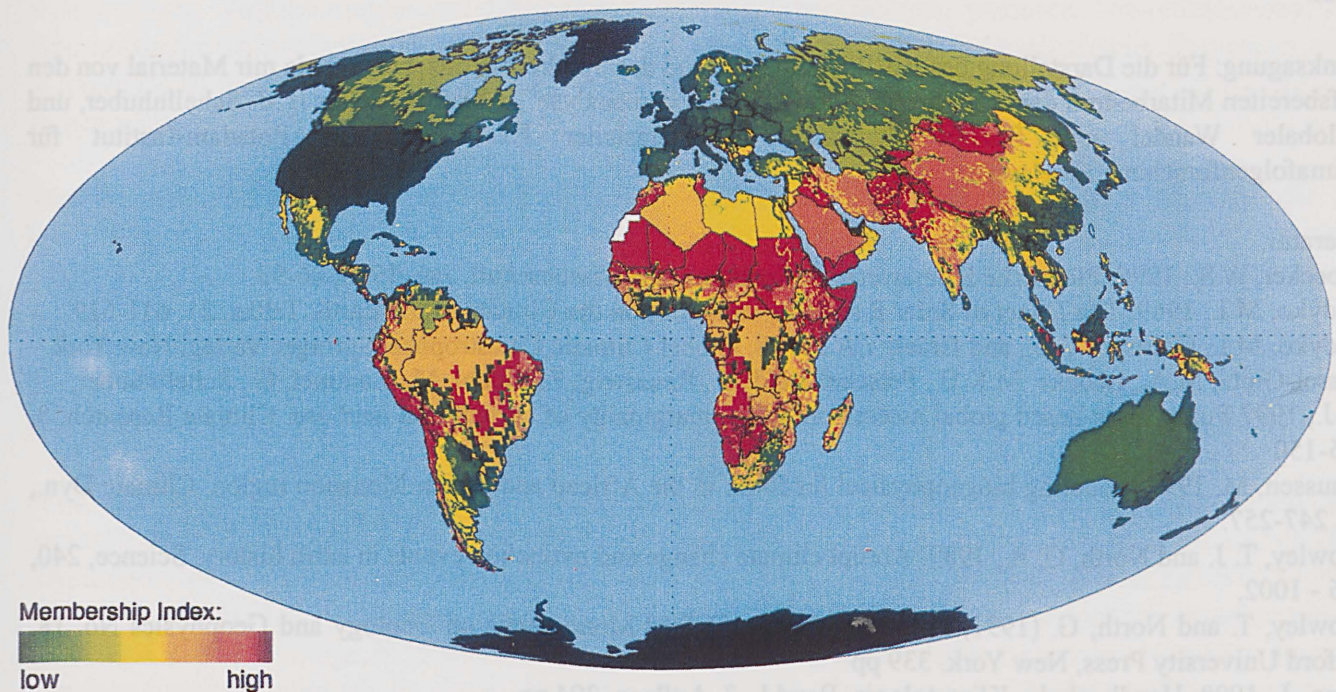


Abb.6: Globale Verteilung der Gebiete, die für das Sahel-Syndrom disponiert sind. Die rot gekennzeichneten Gebiete sind besonders vom Sahel-Syndrom bedroht, in den grün gekennzeichneten Flächen besteht nur eine sehr geringe Disposition (Nach Schellnhuber et al., 1997)

Die weitere Analyse eines Syndroms betrifft dann die Faktoren, die zum Ausbruch eines Syndroms führen können, also, wiederum in Analogie zur Medizin, die Exposition. Ist in einer Region ein Syndrom "ausgebrochen", muss die Intensität bzw. Expressivität analysiert werden. Letzterer Schritt kann auch als Validierung der Dispositionsanalyse betrachtet werden.

## SCHLUSSBETRACHTUNG

In den letzten Jahren hat sich das Bild der Klimamodellierung gewandelt. Neben der Verfeinerung der Modelle, die den Zustand einzelner Klimaundersysteme so detailliert wie möglich beschreiben, wird zunehmend die Kopplung sämtlicher Undersysteme des Klimasystems untersucht - ausgehend von der Erkenntnis, dass der Zustand des Klimasystems sich nicht aus der Summe der Zustände der verschiedenen Klimaundersysteme addieren lässt, sondern wesentlich durch die nichtlineare Wechselwirkung zwischen den Undersystemen bestimmt wird. Dies führt dazu, dass die bisher entwickelten komplexen Zirkulationsmodelle der Atmosphäre und des Ozeans mit Modellen der terrestrischen und marinen Biosphäre verknüpft werden. Der zunehmenden Komplexität Rechnung tragend hat sich der Begriff des Klimasystemmodells eingebürgert. Zum anderen werden vom Rechenaufwand her einfachere Klimasystemmodelle entworfen, die die einzelnen Klimaundersysteme zwar nur grob wiedergeben, aber sich dafür zur Klimasystemanalyse eignen, für die zahlreiche Simulationen über lange Zeiträume von mehreren Jahrtausenden notwendig sind.

Da der Mensch die Zusammensetzung der Atmosphäre sowie die Oberfläche der Erde in einem für geologische Zeiträume drastischen Maße verändert, ist zu vermuten, dass sich auch der Zustand des Klimasystems bereits zu ändern beginnt (Hasselmann, 1997). Aber selbst wenn diese Vermutung sich als unbegründet herausstellen sollte, so steht doch fest, dass der Mensch wegen der zunehmenden Zivilisationsdichte immer anfälliger wird gegen Wetterextrema und Klimaänderungen. Daher wird es notwendig, die Belastbarkeit des Erdsystems zu untersuchen und insbesondere die Wechselwirkung zwischen Anthroposphäre und Ökosphäre zu erkunden. Zu diesem Zweck werden Erdsystemmodelle entwickelt, für die zum Teil vollkommen neue Konzepte gefunden werden müssen, da sich der Zustand und die Dynamik der Anthroposphäre nur schwer mit dem Werkzeug der Thermodynamik analysieren lässt.

Danksagung: Für die Darstellung des ICLIPS-Projektes und des Syndrom-Konzeptes wurde mir Material von den hilfsbereiten Mitarbeitern der Abteilungen "Integrierte Systemanalyse", Abteilungsleiter H.-J. Schellnhuber, und "Globaler Wandel und Soziale Systeme", Abteilungsleiter F.L. Toth, des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung überlassen.

### Literatur:

- Broecker, W.S., 1996: Plötzliche Klimawechsel. Spektrum der Wissenschaft, Jan. 1996, 86-93.
- Budyko, M.I., 1969: The Effect of Solar Radiation Variations on the Climate of the Earth. *Tellus*, 21, 611-619.
- Budyko, M.I., Golitsyn, G.S., and Israel, Y.A., 1988: *Global Climatic Catastrophes*. Springer Verlag, New York.
- Cassel-Gintz, M.A., Lüdeke, M.K.B., Petschel-Held, G., Reusswig, F., Plöchl, M., Lammel, G., Schellnhuber, H.-J., 1997 Fuzzy logic based global assessment of the marginality of agricultural land use. *Climate Research*, 8, 135-150
- Claussen, M. 1997 Modeling biogeophysical feedback in the African and Indian Monsoon region. *Climate Dyn.*, 13, 247-257.
- Crowley, T. J. and North, G. R., 1989: Abrupt climate change and extinction events in earth history. *Science*, 240, 996 - 1002.
- Crowley, T. and North, G. (1991) *Paleoclimatology*, Oxford Monographs on Geology and Geophysics No. 18. Oxford University Press, New York. 339 pp
- Hann, J., 1908: *Handbuch der Klimatologie*, Band I., 3. Auflage, 394 pp.
- Hasselmann, K., 1997 Are we seeing global warming? *Science*, 276, 914-915
- Lorenz E.N. (1968) Climatic determinism. *Meteor. Monog.* 8: 1-3

- North, G.R., Cahalan, R.F. & Coakley, J.A. Jr. 1981 Energy balance climate models. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 19, 91-121.
- Petschel-Held, G., Block, A., Schellnhuber, H.-J., 1995: Syndrome des Globalen Wandels. *Geowissenschaften*, 13, 81-87
- Rahmstorf S (1996) On the freshwater forcing and transport of the Atlantic thermohaline circulation. *Climate Dyn.*, 12, 799-811.
- Schellnhuber, H.-J., Block, A., Cassel-Gintz, M., Kropp, J., Lammel, G., Lass, W., Lienenkamp, R., Loose, C., Lüdeke, M.K.B., Moldenhauer, O., Petschel-Held, G., Plöchl, M., Reusswig, F., 1997 : Syndromes of Global Change. *GAIA*, 6, 19-34.
- Toth, F.L., Bruckner, Th., Füssel, H.-M., Leimbach, M., Petschel-Held, G., Schellnhuber, H.-J., 1997: The tolerable windows approach to integrated assessments. Paper presented at the IPCC Asia-Pacific Workshop on Integrated Assessment Models, Tokyo, Japan, 10-12th March, 1997.
- Walker, J.C.G., Hays, P.B., and Kasting, J.F., 1981: A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 86, C10, 9776-9782.
- Watson, A.J., and Lovelock, J.E., 1983: Biological Homeostasis of the Global Environment: The Parable of Daisyworld. *Tellus*, 35B, 284-289.