

NOVA ACTA LEOPOLDINA

Abhandlungen der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina

Im Auftrage des Präsidiums herausgegeben von

WERNER KÖHLER

Vizepräsident der Akademie

NEUE FOLGE

NUMMER 285

BAND 69

Wachstum und Wachstumsgrenzen

Vorträge anlässlich der Jahresversammlung
vom 24. bis 27. April 1993 zu Halle (Saale)

Herausgegeben von
Werner KÖHLER, Jena
Vizepräsident der Akademie

Mit 181 Abbildungen und 24 Tabellen



Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale) 1993

Redaktion: Dr. Michael KAASCH und Dr. Joachim KAASCH

Auf der Titelseite des Bandes ist das Siegel der Urkunde abgebildet, mit dem Kaiser LEOPOLD 1687 die der Akademie verliehenen Privilegien erneut bestätigt hat. Siegel und Urkunde befinden sich noch im Besitz der Leopoldina.

Die Schriftenreihe Nova Acta Leopoldina erscheint in der Barth Verlagsgesellschaft mbH Leipzig · Berlin · Heidelberg, Postfach 109, 04001 Leipzig, Tel. (0341) 7137570.
Jedes Heft ist einzeln käuflich!

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Wachstum und Wachstumsgrenzen : vom 24. bis 27. April 1993
zu Halle (Saale); mit 24 Tabellen / Deutsche Akademie der
Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale). Hrsg. von Werner
Köhler. – Leipzig; Berlin; Heidelberg; Barth, 1993

(Nova Acta Leopoldina; N.F., Nr. 285 : Bd. 69) (Vorträge anlässlich
der Jahresversammlung / Deutsche Akademie der Naturforscher
Leopoldina Halle (Saale); 1993)

ISBN 3-335-00385-3

NE: Köhler, Werner [Hrsg.]; Deutsche Akademie der Naturforscher
Leopoldina <Halle, Saale>; Nova Acta Leopoldina; Deutsche Akademie
der Naturforscher Leopoldina <Halle, Saale>; Vorträge anlässlich der ...

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdruckes, der fotomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung, vorbehalten.

© Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.

August-Bebel-Straße 50 a, 06108 Halle (Saale)/Postfach 11 27, 06019 Halle (Saale), Tel. (0345) 250 14

Herausgeber: Prof. Dr. Dr. Dr. h. c. Werner KÖHLER, Vizepräsident der Akademie

ISBN 3-335-00385-3

ISSN 0369-5034

Printed in Germany 1993

Gesamtherstellung: Druckerei zu Altenburg GmbH

Inhaltsverzeichnis

1. Feierliche Eröffnung

GEILER, Gottfried: Begrüßungsansprache	8
ORTLEB, Rainer: Grußwort des Bundesministers für Bildung und Wissenschaft	13
MÜNCH, Werner: Grußwort des Ministerpräsidenten des Landes Sachsen- Anhalt	17
RAUEN, Kaus-Peter: Grußwort des Oberbürgermeisters der Stadt Halle (Saale)	21
PARTHIER, Benno: Ansprache des Präsidenten der Akademie	25
Laudatio für Wolfgang GEROK, Freiburg i. Br., anlässlich der Verleihung der <i>Cothenius-Medaille</i>	44
Laudatio für Bernhard HASENSTEIN, Freiburg i. Br., anlässlich der Verleihung der <i>Cothenius-Medaille</i>	47
Laudatio für Rudolf THAUER, Marburg, anlässlich der Verleihung der <i>Carus- Medaille</i>	50
Laudatio für Rüdiger WEHNER, Zürich, anlässlich der Verleihung der <i>Carus- Medaille</i>	52
Laudatio für Dieter OESTERHELT, Martinsried, anlässlich der Verleihung der <i>Mendel-Medaille</i>	55
Laudatio für Gottfried SCHATZ, Basel, anlässlich der Verleihung der <i>Schleiden- Medaille</i>	58
MARKL, Hubert: Wissenschaft: Wachstum ohne Grenzen?	63

2. Wissenschaftliche Sitzungen

MEINARDUS, Günter: Ansätze zur mathematischen Beschreibung von Wach- tumsprozessen.	79
SCHMALZRIED, Hermann: Reaktives Wachstum: Festkörper	91
ELSÄSSER, Hans F.: Das Wachstum von Sternen und Galaxien	107
SCHLÜTER, Arnulf: Der wachsende Kosmos und die Realität der Quanten .	127
GRASSL, Hartmut: Der zusätzliche Treibhauseffekt und seine Folgen, ein wei- terer Nord-Süd-Konflikt	137
BRETTERBAUER, Kurt: Klimaentwicklung und Meeresspiegel	151
SCHWARZ, Helmut: Fullerene: Eine neue Dimension in der Chemie?	167
STETTER, Karl O.: Mikrobielles Leben bei 100°C	183
AMRHEIN, Nikolaus, und GRILL, Erwin: Pflanzliches Wachstum und seine Regulatoren	199

Der zusätzliche Treibhauseffekt und seine Folgen, ein weiterer Nord-Süd-Konflikt

Von Hartmut GRASSL (Hamburg)

Mit 3 Abbildungen



Hartmut Grassl

Die Besonderheit der Erdatmosphäre

Ich kehre zurück auf unseren kleinen Planeten Erde, der – das macht ihn so außergewöhnlich – mit den anderen in seiner chemischen Zusammensetzung schlecht vergleichbar ist. Unsere Atmosphäre ist, anders als die der Nachbarplaneten, nicht von einem der Haupttreibhausgase dominiert. Während die Atmosphären von Mars und Venus im wesentlichen aus CO_2 bestehen, ist bei der Erdatmosphäre die Zusammensetzung so ungewöhnlich, daß Klimarelevanz nur 3% der Masse der Erdatmosphäre erreichen, d. h., Strahlungsflußdichten werden von Nebenbestandteilen bestimmt, wozu auch Wasserdampf und Wolken gehören.

Beginnen wir mit Fakten aus den Naturwissenschaften, denn bevor wir Diskussionen über Folgen menschlichen Verhaltens für das Klimasystem führen, müssen wir uns klar darüber werden, was wir über die grundsätzlichen Eigenarten dieses Systems wissen. Höchstens 0,3% aller Moleküle der Atmosphäre bestimmen den Treibhauseffekt, der zur Zeit knapp über oder etwas unter – je nach Berechnungsmethode – 30 Grad beträgt. Diese gegenüber einem atmosphärelosen Planeten vorhandene kräftige Erwärmung wird im wesentlichen vom Wasserdampf, dem Kohlendioxid und dem Ozon unterhalten sowie von den Wolken etwas abgeschwächt. Der Wasserdampf ist ein Gas, das aufgrund seiner hohen Temperaturabhängigkeit nur auf die Stimulation durch die anderen Treibhausgase reagiert, so daß wir von nur 0,3% als Anstoß reden dürfen. Mit der Substanz Wasser kommt die eigentliche Dynamik in das Klimasystem, denn der Wasserkreislauf ist der entscheidende Stoffkreislauf für unseren Planeten. Gelegentlich sind 85% der Oberfläche der Erde mit der Substanz Wasser bedeckt. Das sind die Ozeane und die Eisgebiete sowie die Schneedecken und die benetzte Vegetation, so daß wir von einem Wasserplaneten reden können.

Kleine Ursache – große Wirkung

Das Klimasystem hat Verzweigungspunkte; heute würde man sagen, es neigt zum Chaos. Zum Beispiel erzwingen kleine Umverteilungen der Einstrahlung von der Sonne den Wechsel von Eiszeiten zu Warmzeiten oder besser von Warmzeiten (Interglazialen) zu Kaltzeiten (Glazialen) innerhalb der jetzigen, seit etwa 3 Millionen Jahren auf der Nordhalbkugel und seit etwa 30 Millionen Jahren auf der Südhalbkugel andauernden Eiszeit. Wir leben also zur Zeit insgesamt in einem besonders kalten Abschnitt der Erdgeschichte. Aber erst seit einigen Jahren wissen wir, daß der Anstoß zu diesem Eiszeit-Warmzeit-Rhythmus mit einer Periode von ca. 100000 Jahren von den kleinen Bahnänderungen der Erde um die Sonne stammt, und diese wiederum wesentlich durch die Nachbarplaneten Jupiter und Saturn hervorgerufen werden. Dabei wird nicht die Energie der Sonne, die den Planeten trifft, insgesamt wesentlich verändert (nur die Exzentrizitätsschwankungen der Erdbahn können bis zu 0,1% an der Gesamtenergie ändern). Aber die Umverteilung der Bestrahlung auf dem Planeten machte etwa alle 100000 Jahre aus Skandinavien einen Eisschild oder ein bewaldetes Gebiet. Diese Umverteilung von Sonnenenergie (im globalen Mittel absorbiert die Erde 237 W/m^2) erreicht allerdings dann regional 20 bis 30 W/m^2 im Monatsmittel, wenn z. B. aus der fast kreisförmigen Bahn der Erde um die Sonne eine Ellipse mit der Exzentrizität 0,06 wird und die Lage der Bahnellipse im Raum so variiert, daß der sonnennächste Punkt der Bahn in 23000 Jahren einmal durch das Kalenderjahr läuft bzw. die

Neigung der Rotationsachse der Erde zur Bahn um die Sonne zwischen 22 und 24,5 Grad in etwa 40000 Jahren schwankt. Wenn wir jetzt politisch agierten, müßten wir sagen, daß Vorsorge geboten ist, wenn es zu solchen Klimaumschwüngen bei sehr kleinen Anstößen kommen kann.

Die Strahlungsbilanz des Planeten

Seit wenigen Jahren können wir die Strahlungsbilanz des Planeten vom Satelliten aus für bestimmte Monate oder auch für Jahresmittelwerte messen. Abbildung 1 (RIELAND und RASCHKE 1991) zeigt für den Juli 1986 die Nettostrahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre. Sie schwankt von maximal etwa 120 W/m^2 in den nördlichen ozeanischen Tropen bis zu -120 W/m^2 im Gebiet der Antarktis.

Die eigentlichen Energiespeicher sind demnach die Ozeangebiete in den Tropen und auf der Sommerhalbkugel. Die Landgebiete brauchen oft sogar auch im Sommerhalbjahr noch etwas Energiezufuhr von den Ozeanen. Die Sahara z. B. (hier die Atmosphäre und die Oberfläche) ist sogar im Sommer teilweise eine Energieverlustzone. Dieses eigenartige Verhalten der Landgebiete wird nicht von der Variation der Einstrahlung von der Sonne, sondern von der ganz starken Variation der

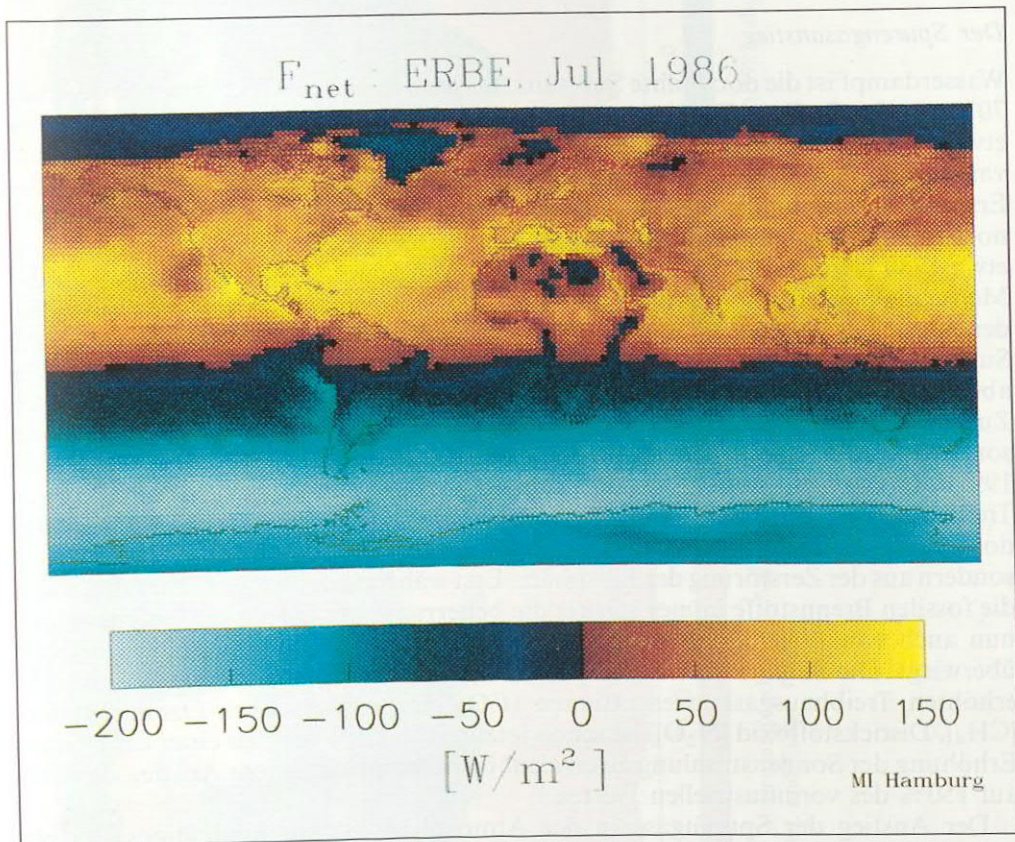


Abb. 1 Nettostrahlungsfluß am Rand der Atmosphäre für Juli 1986 abgeleitet aus Daten der Satelliten des *Earth Radiation Budget Experiments* (ERBE). Man beachte die Energiespeicherung in den Ozeangebieten und den Verlust über der zentralen Sahara (RIELAND und RASCHKE 1991).

Wärmeabstrahlung von der Erde bestimmt. Die Wärmestrahlung in den Weltraum von nur etwa 120 W/m^2 über der inneren Antarktis bis zu 310 W/m^2 über den asiatischen Wüstengebieten zeigt ein bemerkenswertes Phänomen: In den inneren Tropen gibt unser Planet verglichen mit den Wüstengebieten weit weniger Energie in den Weltraum ab. Das liegt an den hochreichenden Amboßwolken der tropischen Gewitter, die dort sogar das Monatsmittel der Strahlungsbilanz wesentlich prägen.

Diese Wolken, obwohl sie besonders häufig über den im Tagesmittel wärmsten Teilen unseres Planeten aufsteigen, sind an der Oberkante die kältesten der Troposphäre. Ich habe vor wenigen Wochen in diesem Gebiet bei einem großen internationalen Experiment (TOGA-COARE: *Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment*) noch Vertikalprofile der Temperatur und Feuchte gemessen. Bei diesen Sondierungen der Atmosphäre fanden wir Temperaturen stets unter -80°C , sogar bis -91°C , in Höhen von 15 bis 17 km, gemessen an der Oberkante solcher tropischer Cumulonimben. Die Gebiete mit der niedrigsten Abstrahlung in den Weltraum im Juli 1986 lagen über dem wärmsten Ozeangebiet bei Hinterindien und Indonesien, wo die Ozeantemperatur die überwiegende Zeit des Jahres über 28°C liegt und gelegentlich fast 31°C erreicht.

Der Spurengasanstieg

Wasserdampf ist die dominante Substanz für den Treibhauseffekt dieser Erde. Etwa 70% von den 30 Grad Treibhauseffekt werden vom Wasserdampf getragen. Als nur etwa 10 Tage in der Troposphäre verweilendes Gas hat er eine von Tag zu Tag stark variierende Verteilung, so daß man sich leicht vorstellen kann, wie schwierig das Erstellen guter Klimamodelle sein wird (Abb. 2). Obwohl sie das natürliche System noch nicht richtig verstehen, müssen die Klimatologen sich mit den Folgen der seit etwa 1750 (also seit Beginn der Industrialisierung) so rasch wie nie zuvor in der Menschheitsgeschichte veränderten Zusammensetzung der Atmosphäre auseinandersetzen. Die meisten klimarelevanten Gase nehmen zu, aber es gibt auch eine Substanz, die sehr klimarelevant (drittichtigstes Treibhausgas) ist, die im Mittel abnimmt, nämlich das Ozon (O_3). Wir sind sicher, daß diese Veränderung der Zusammensetzung der Erdatmosphäre nicht aus dem natürlichen System stammt, sondern vom Menschen in das System hineingetragen ist (WMO/UNEP 1990, 1992). Es handelt sich in erster Linie um den Anstieg des zweitichtigsten Treibhausgases der Erdatmosphäre, des Kohlendioxids (CO_2). Bis etwa 1940 dominierte seinen Anstieg nicht der Anteil aus der Verbrennung fossiler Energien, sondern aus der Zerstörung der Biosphäre. Erst während der letzten Jahrzehnte sind die fossilen Brennstoffe immer stärker die beherrschende Quelle geworden, so daß nun auch von 1750 bis in die Gegenwart integriert die fossile Quelle eindeutig überwiegt. Die Summe aller anthropogenen Strahlungsbilanzstörungen durch die erhöhten Treibhausgaskonzentrationen (CO_2 , troposphärisches Ozon, Methan [CH_4], Distickstoffoxid [N_2O]) ist schon jetzt mit $+2,5 \text{ Wm}^{-2}$ zu einer ca. 1%igen Erhöhung der Sonnenstrahlung äquivalent oder entspricht einem Anstieg des CO_2 auf 150% des vorindustriellen Wertes.

Der Anstieg der Spurengase in der Atmosphäre ist ein eindeutiges Beispiel für Kurven naiven Wachstums, fast reine exponentielle Anstiege (Deutscher Bundestag 1992). Seit 1750 stiegen an: Methan, Kohlendioxid, Distickstoffoxid; seit etwa 1950 FCKW. Ursache der beobachteten Anstiege sind exponentiell

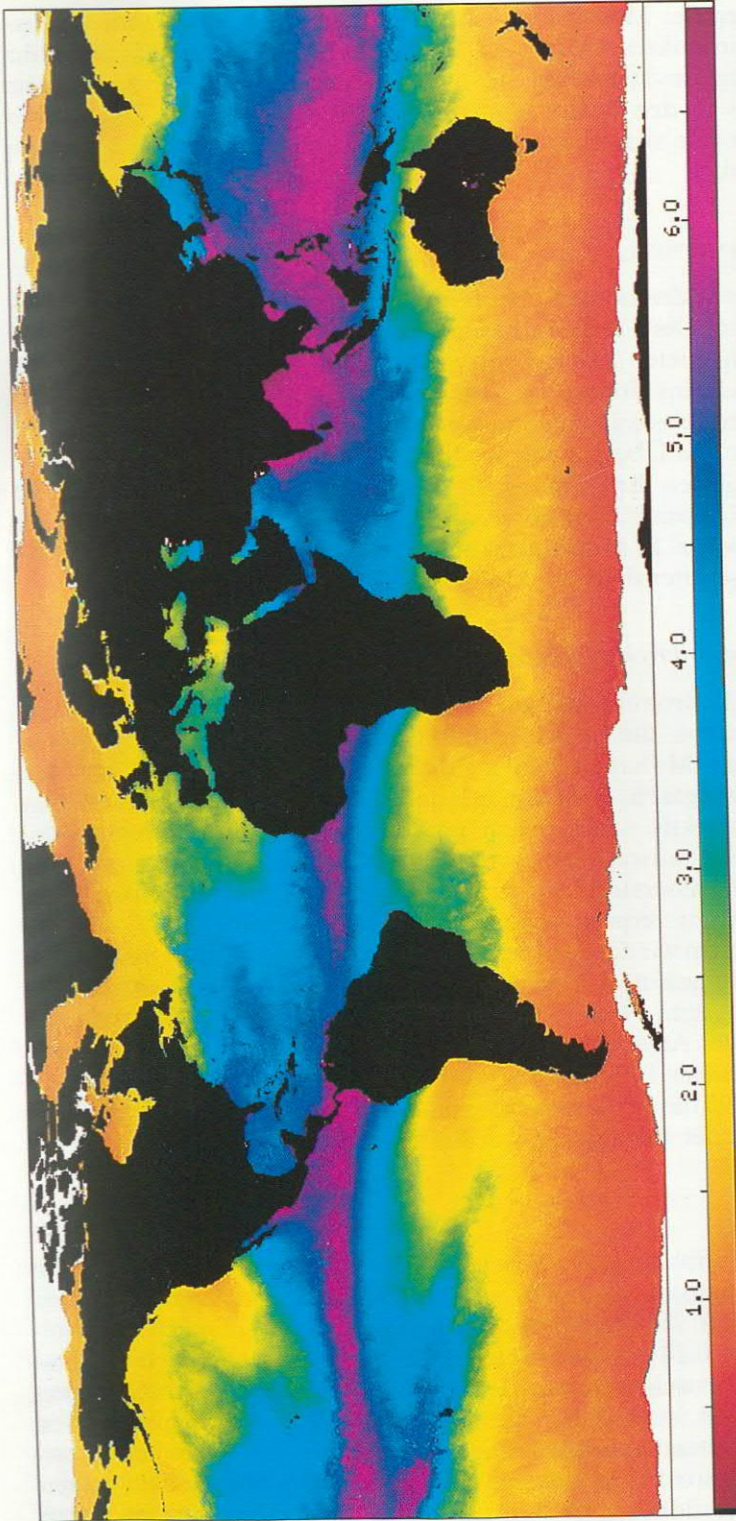


Abb. 2 Wasserdampfgehalt der Atmosphäre über dem Ozean in g cm^{-2} für August 1987, abgeleitet aus Daten eines amerikanischen Marinesatelliten (SCHLÜSSEL und EMERY 1990)

zunehmende Aktivitäten des Menschen, bisher am besten ausgedrückt im Wachstum des Bruttosozialproduktes sehr vieler Länder mit 2, 3 bzw. 5% pro Jahr sowie dem Bevölkerungszuwachs. Die Störung der Atmosphäre, der zusätzliche Treibhauseffekt, wuchs in den beiden vergangenen Jahrzehnten mit etwas über 2% pro Jahr an, reduzierte sich jüngst durch den Zusammenbruch der Industrie im ehemaligen Ostblock.

Die Verzögerung der Erwärmung

Die Wirkung veränderter Zusammensetzung der Atmosphäre tritt erst um Jahrzehnte verzögert voll ein. Der Ozean mit seiner hohen Wärmekapazität ist in den tiefer mischenden Teilgebieten fähig, einige Jahrzehnte lang ihm angebotene zusätzliche Wärme flüsse ins Innere zu transportieren und sich dabei an der Oberfläche nur marginal zu erwärmen, um wenige Zehntel Grad. Daraus ergeben sich massive Folgen für den Übergang in ein Klima mit höherem Treibhauseffekt, weil wegen der verzögerten Erwärmung in tiefmischenden Ozeangebieten die Gradienten zwischen Kontinental- und Ozeangebieten in dieser Übergangsphase immer größer werden, was z. B. Monsunzirkulationen anfacht. In den Modellrechnungen zeigen sich diese intensivierten Monsunzirkulationen ebenfalls.

Die Bedrohung des Klimas durch synthetische Substanzen

Eine prinzipiell größere Bedrohung als zunehmendes CO₂ ist das Hinzufügen neuer klimarelevanter Substanzen, die in der Erdatmosphäre bisher nicht vorkamen. Schon jetzt hat nur ein Milliardstel aller Moleküle den Rang zwei bei den anthropogenen Treibhausgasen erklommen, und die Bruchstücke haben das Ozonloch über der Antarktis nachweislich provoziert: die Fluorkohlenwasserstoffe. Man könnte sich ausrechnen, wieviele Millionen Tonnen eines sehr langlebigen Fluorkohlenwasserstoffs wir in die Atmosphäre bringen müssen, um ihr einen Treibhauseffekt zu verpassen, den es noch nicht gegeben hat.

Glücklicherweise kommen wir dagegen beim gleichen Thema zur Erfolgsgeschichte der ersten globalen Umweltschutzmaßnahme. Sie geht im *Montrealer Protokoll*, der Ausführungsbestimmung zum Wiener Abkommen zum Schutz der Ozonschicht, zurück auf die Störung der Atmosphäre durch fremde Substanzen. In der zweiten Verschärfung vom November 1992 erzwingt es den Ausstieg aus der FCKW- und Halon-Produktion bis 1995 für die Industriestaaten und wenig später für alle anderen Teilnehmerstaaten (95% der Produktion werden vom Protokoll erreicht).

Der Sonderfall Ozon

Ein relativ kurzlebiges Treibhausgas, bei dem in den achtziger Jahren drastische Änderungen beobachtet wurden, ist das Ozon (O₃). Glücklicherweise gibt es bisher keine menschliche Aktivität, die Quelle stratosphärischen Ozons, nämlich kurzwellige Sonnenstrahlung ($\lambda < 0,24 \mu\text{m}$) und molekularer Sauerstoff (O₂), zu beeinflussen. Nur in Regionen, die weit weg von den Hauptquellgebieten für O₃ in den tropischen Regionen liegen, sind bisher die durch den Menschen manipulierten Abbaumechanismen bedeutend geworden. Die signifikanten Abnahmen der Ozonkonzentration in der Stratosphäre um ca. 20 km Höhe treten in den hohen nördlichen und den hohen südlichen Breiten auf, wobei die Verringerung im Süden

aufgrund der dort unterschiedlichen meteorologischen Verhältnisse im Winterhalbjahr bis in das späte Frühjahr hinein dominiert (Deutscher Bundestag 1992). Es ist dort um 20 km Höhe entschieden kälter, so daß in Schichten von 14 bis 25 km Höhe die sogenannten polaren stratosphärischen Wolken aus Salpetersäuretrihydrat ($\text{HNO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) häufiger entstehen können. An der Oberfläche dieser Wolkenpartikel werden bei Sonnenaufgang nach der Polarnacht Reservoirsubstanzen des Chlor (sie stammen zu 5/6 von den FCKW) als Katalysatoren für den Ozonabbau aktiviert, so daß in jedem Frühjahr über der Antarktis das Ozon in der eigentlichen Ozonschicht innerhalb von etwa 4 bis 6 Wochen fast vollständig verschwindet. Der Säulengehalt des Ozons ist in einem Gebiet von etwa 10 Millionen km^2 im Oktober jeweils schon auf etwa 40% der ursprünglichen Werte (seit 1957 gibt es Beobachtungen) geschrumpft, d. h., es findet ein massiver katalytischer Ozonabbau im antarktischen Frühling statt. In der nördlichen Hemisphäre ist das Ausmaß der Ozonabnahme geringer, weil die sehr niedrigen Temperaturen unter -82°C mit polaren stratosphärischen Wolken, die es dort auch gelegentlich gibt, nicht bis ins Frühjahr hinein überstehen können. Wenn die Sonne im März in die innere Arktis scheint, sind die Wolken verschwunden, und die hohen Ozonabbaupotentiale existieren nicht mehr.

Die Reihung der Treibhausgase

Die Reihung der Treibhausgase nach Bedeutung lautet: Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon, Lachgas, Methan, wobei die letzten zwei jeweils nur etwa für 1 K von 30 K Treibhauseffekt verantwortlich sind. Wirklich wesentlich sind die ersten drei. Für viele ist zunächst nicht klar, daß — energetisch gesehen — Ozon im Wärmestrahlungsbereich wichtiger ist als im Sonnenstrahlungsbereich. Obwohl es die Temperaturstruktur der Atmosphäre aufgrund der Absorption von ultraviolettem und sichtbarem Licht dominiert, nämlich für den Temperaturanstieg mit der Höhe in der Stratosphäre verantwortlich ist, ist die Behinderung der Abstrahlung von der Oberfläche in den Weltraum durch die Rotationsschwingungsbande bei $9,6 \mu\text{m}$ Wellenlänge stärker als die Bremsung der Sonnenstrahlung beim Vordringen zur Erdoberfläche. Der unterschiedliche Einfluß des Menschen auf die Zusammensetzung der Atmosphäre ist sicher zu reihen, wenn man die Strahlungsbilanzstörung der letzten 10 oder 20 Jahre nimmt: CO_2 , FCKW, CH_4 , N_2O . Integriert man dagegen über den Zeitraum von 1750 bis in die Gegenwart, wird es schon etwas schwieriger, aber die Reihung gelingt noch immer: CO_2 , CH_4 , FCKW, N_2O . Für das Ozon ist die Situation am kompliziertesten, weil es in der Troposphäre zunimmt, in der Stratosphäre aber breitenabhängig abnimmt. Wir verfügen über keine gesicherten Zahlen, ob der Gesamttreibhauseffekt der Erdatmosphäre sich wegen der Konzentrationsänderungen des Ozons verringert oder verstärkt hat. In Regionen wie der unseren, in denen wir in unteren Schichten eine sehr starke Ozonzunahme von bis zu 2% pro Jahr seit 25 Jahren finden, gibt es Teilkompensation der Abnahme in der hohen Atmosphäre.

Da das Klimasystem auf Störungen stets reagiert, sind die Rechnungen der Störung der Strahlungsbilanz eigentlich Fiktionen. Wenn wir sagen, daß die Strahlungsbilanz so gestört ist, als ob es zu einer Erhöhung der Sonneneinstrahlung um 1% gekommen wäre, wenn die jetzigen Treibhausgaszusätze aufsummiert werden, dann vergleichen wir nur Antriebe zu Zirkulations- und damit Klimaänderungen. Nach Reaktion des Klimasystems, stellt sich die alte Reihenfolge der Treibhausgase auf höherem Treibhausniveau wieder her: Wasserdampf bleibt dominant, CO_2 an zweiter Stelle,

dann kommen Ozon, Lachgas, Methan und zum Schluß die neue Stoffgruppe der Fluorkohlenwasserstoffe, die wegen ihrer Molekülstruktur schon bei sehr niedrigen Konzentrationen sehr treibhausrelevant sind.

Gründe für die Störung der Zusammensetzung

Die Ursachen für den Spurengasanstieg zeigen sich schon in der Definition *nicht erneuerbare* Rohstoffe. Nicht erneuerbar heißt ganz schlicht, daß wir sie zu schnell der Erdkruste entnehmen. Die Nutzung der Naturgüter erfolgt mit höherer Entnahmerate als Nachbildungsrate. Der fast unkontrollierte technische Fortschritt ist der Motor der raschen Naturgüternutzung. Hinzu kommt, daß Wachstum beim Rohstoffdurchsatz momentan ökonomisch kein Problem ist, aber die Mülllawine uns eingeholt hat. Anders als es der *Club of Rome* 1972 zum ersten Mal formulierte, ist nicht die Ressourcenknappheit das eigentliche Problem auf dieser Erde, sondern es sind die fehlenden Senken für den Abfall. In aller Munde ist der feste Müll, den wir im eigenen Haus produzieren, aber kaum jemand bedenkt, daß der Hauptmüll gasförmig und langlebig ist und daher über alle Grenzen hinweg jeden Bürger dieser Erde betrifft. Die Lebensdauer, falls als $1/e$ -Zeit definiert, beträgt für anthropogenes CO_2 mindestens 100 Jahre, für Methan etwa 10 und für das NO_2 gar 150 Jahre sowie für das FCKW je nach Typ 60 bis mehrere hundert Jahre. Die eigentlich Betroffenen einer Klimaänderung können also diejenigen sein, welche kaum zur Störung beitragen, z. B. der Bangla-Deshi.

Jeder Bundesbürger produzierte im vorigen Jahr durch seine Aktivitäten im Mittel 13 t CO_2 . Bei Wissenschaftlern, deren Dienstreisebudget sehr hoch ist, liegt der Wert noch wesentlich darüber. Mein eigenes CO_2 -Budget wird von den Dienstreisen dominiert, auch dann, wenn ich in Deutschland fast nur mit der Bahn fahre.

Warum Klimamodelle?

Warum aber sehen wir bei so starken Spurengasanstiegen, die einem Hub Eiszeit-Warmzeit entsprechen, noch keine wesentlichen Klimaänderungen? Der Ozean verzögert die Erwärmung an der Erdoberfläche um Jahrzehnte, die Eisgebiete wirken ebenfalls verzögernd. Ein weiterer Grund ist die hohe natürliche Variabilität. Sie ist in der Klimatologie so groß, daß man oft etwa 100 oder 150 Jahre messen muß, bevor man globale Trendaussagen machen kann. Auch wenn im nächsten Winter hier in Halle der Schnee einen $3/4$ m hochliegen sollte, was wahrscheinlich ein Extremum seit Beginn der Messungen wäre, ist das noch kein Beweis gegen die Erwärmung durch den zunehmenden Treibhauseffekt. Wir haben noch nicht lange genug gemessen, um überhaupt die Extremwertstatistik im natürlichen System ausreichend genau zu kennen.

Also brauchen wir Klimamodelle. Die Berechnung von Klimazuständen bei vorgegebener Zusammensetzung der Erde ist eine sehr schwierige Aufgabe. Erforderlich ist die Lösung eines Systems gekoppelter, nichtlinearer, partieller, prognostischer Differentialgleichungen mit veränderlichen, von der Lösung abhängigen Randbedingungen für das dreidimensionale System Erde. An so ein Problem traut sich auch der exakte Naturwissenschaftler nicht so leicht. Die Meteorologen wagten sich schon früh daran. Sie müssen sogar noch eine weitere Komplizierung berücksichtigen, wenn sie Wettervorhersagen erstellen, denn dazu sind die Gleichungen auch noch als Anfangswertproblem zu lösen. Für die Wettervorhersage

benötigt man also gute Ausgangsdaten. Bei der Klimavorhersage hingegen ist es prinzipiell unerheblich, ob Ozean und Atmosphäre sich am Anfang bewegen. Wenn die planetarischen Konstanten und die physikalischen Parametrisierungen für nicht vom Rechengitter aufgelöste Prozesse stimmen, dann wird nach einigen Jahren das System realistisch strömen. Wenn sich nach 3000 Jahren der Ozean etwa dreimal global umgewälzt hat, dann ist der Kontrollklimazustand erreicht. Weil aber soviel Rechenzeit nicht zur Verfügung steht, startet man doch mit annähernd realistischen dynamischen Feldern.

Die in Klimamodellen integrierten Gleichungen neigen zum Chaos, das ist bekannt. Als Klimatologe muß man sich daher fragen, ob die Verzweigungspunkte in diesem System erkennbar sind. Gegenwärtig haben wir gute Chancen, ein vergleichsweise stabiles Klima zu betrachten, weil es auf der nördlichen Hemisphäre fast kein Eis mehr gibt. Damit ist die positive Eisalbedo-Temperatur-Rückkopplung nicht mehr so aktiv. Hätten wir heute ein Maximum der Eiszeit, säßen wir hier in Halle in der Tundra vor der nahen Endmoränenlandschaft, und Kiel wäre unter dem Inlandeis, dann wäre die Empfindlichkeit in diesem System entschieden größer. Der Meeresspiegel stieg von 18000 vor heute bis etwa 8000 vor heute um ca. 120 m an, weil das Eis auf der nördlichen Hemisphäre fast vollständig verschwunden ist. Was sagen nun diese gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modelle aus, für die ein Supercomputer bei einem Hundertjahresszenario etwa ein halbes Jahr braucht? Zunächst erhalten wir eine angesichts des Aufwandes fast kläglich erscheinende Kurve: den globalen Anstieg der mittleren Temperatur über diese 100 Jahre (HASSELMANN et al. 1992). In Abbildung 3 ist das »Business as usual«, vorgegeben

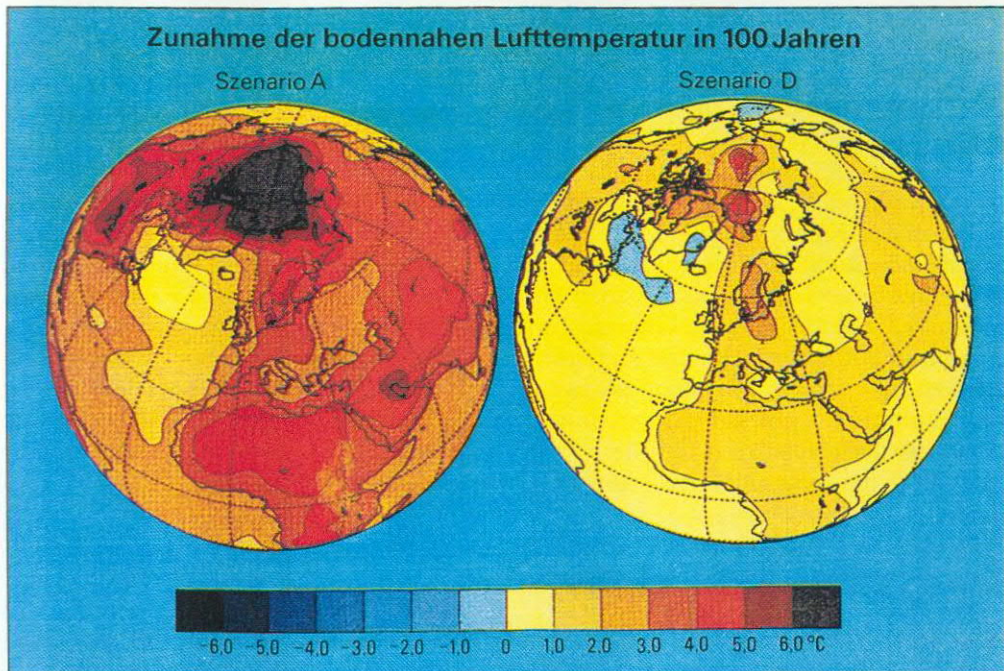


Abb. 3 Die Temperaturzunahme in °C bei ungebremster Emission von langlebigen Treibhausgasen (Szenario A des Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]) sowie bei drastischer Reduzierung (Szenario D) (CUBASCH et al. 1992)

vom *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), hochgerechnet. Man wollte also die Frage beantworten, wie warm es wird, wenn wir nichts unternehmen, d. h. wenn wir weiterhin reich bleiben und versuchen, effizienter zu werden, und die Armen arm bleiben.

Mit der Erwärmung, die beim Start des Modells noch nicht realisiert war, berechnen die gegenwärtig besten Modelle einen Temperaturanstieg von etwa 3 Grad im globalen Mittel bis zum Jahre 2100. Das ist beinahe die gleiche Größenordnung wie der Temperaturhub zwischen Eiszeit und Warmzeit, der »nur« 4 bis 4,5 Grad betrug. Auf einer solchen Erde, die nur 4,5 Grad kälter war als die heutige, mußte der Wald in Europa bis zur Riviera zurückweichen. Er ist dann innerhalb einiger 1000 Jahre wieder fast bis zum Nordkap vorgerückt.

Wenn die Berechnungen nun regionalisiert werden, was nur mit größter Vorsicht geschehen sollte, dann zeigt sich, daß der Gradient der Temperatur vom Äquator bis in höhere mittlere Breiten, z. B. bis zum Islandtief, anwächst, d. h., die Zirkulation verstärkt sich, weil dieser Gradient direkt proportional zur Westwinddrift ist, ist keineswegs beendet.

Aber der entscheidende Fortschritt bei der Kopplung der Ozean-Atmosphäre-Modelle war es, daß die langsame Erwärmung des Ozeans in Gebieten mit stärkerer Vermischung bei höherem Treibhauseffekt den Rückgang der Zirkulation verhindert, der jahrzehntelang das Credo vieler Meteorologen für erhöhte Treibhauszenarien war, weil der strömende Ozean in die Modelle bis 1989 nicht integriert war.

Das zweite in Abbildung 3 gezeigte Szenario D heißt *Draconian Measures*; ich nenne es — *Die geläuterte Menschheit*. Der weit geringere Temperaturanstieg würde nur erreicht, wenn der äquivalente CO₂-Gehalt (d. h. nach Umrechnung aller anderen Gase in CO₂-Äquivalente) eindeutig unter der Verdopplung des vorindustriellen Wertes bleibt. Da wir gegenwärtig aber 55% bis zur Verdopplung schon erreicht haben, ist das ein hehres Ziel oder — ehrlicherweise müßte man sagen — schon fast eine Utopie.

Die Modelle können viel mehr als nur Temperaturen berechnen. Schön wäre es, wenn die Modelle die Verteilung der Vegetation auf unserem Globus in Abhängigkeit von den Klimaparametern wiedergeben könnten, sowohl für das gegenwärtige Klima als auch für das zukünftige. CLAUSSEN und ESCH (1992) führten solche Modellierungen durch und fanden für das mit 200 km auflösende Zirkulationsmodell ECHAM-T42 gute Übereinstimmung für das gegenwärtige Klima zwischen Klimamodellparametern und zugehörigem Vegetationstyp. Je höher die räumliche Auflösung, um so weniger Notwendigkeit besteht für die Parametrisierung physikalischer Prozesse. So entstanden im höher aufgelösten Modell nicht nur tropische Wirbelstürme, sondern auch eine realistische Hurrikanstatistik: Im Ozeanteil, der frei von Wirbelstürmen ist, im Südatlantik, entstehen auch im Modell keine.

Wirkung von Klimaänderungen

Alle diese Klimaänderungen hätten die Vereinten Nationen nicht auf den Plan gerufen, wenn sie nicht weitergehende Wirkungen auf die menschliche Gesellschaft oder die natürlichen Ökosysteme hätten. Eine solche Wirkung ist die Verschiebung der Anbauzonen, denn dann ist die Ernährung gefährdet. Zur Zeit ist Hunger überwiegend auf die semiariden Tropen beschränkt, weil dort immer mehr

Menschen in einem Gebiet mit höchster natürlicher Variabilität leben. An einer Meßstation in Nordostbrasilien z. B. fallen in einem Jahr 300 mm, im nächsten aber 1 100 mm Niederschlag. Die unregelmäßig erscheinenden Dürrejahre waren bisher nicht vorherzusagen; sie ließen die jeweiligen landwirtschaftlichen Strukturen fast zusammenbrechen. Sie treiben dann Millionen Menschen in Richtung der großen brasilianischen Städte. Fast alle Slums dieser Multimillionenstädte sind mit »Nordestinos« bevölkert, mit Menschen, die nach einem El Niño-Jahr mit starker Dürre aus ihrer Heimat geflohen sind. Geringfügig erscheinende Verschiebungen der Niederschlagsgürtel werden in den semiariden Tropen, also in den Entwicklungsländern, massive Veränderungen der Landwirtschaft erzwingen.

Eine zweite wesentliche Wirkung von Klimaänderungen ist die Verschiebung von Vegetationszonen. Dazu ein Beispiel: In meiner Heimat gibt es noch etwas Urwald, und die Fichte kommt in diesen Wäldern an den Steilhängen im Naturschutzgebiet Königsee nur vor, wenn die Temperatur im wärmsten Monat eines Jahres zwischen 11 und 14 °C liegt. Denn nur dann ist die Fichte ein dominanter Baum. Erhöht sich in dieser Region die Sommertemperatur um 3 Grad, wird die Fichte das ursprüngliche Gebiet verlassen. Ins Flachland übertragen hieße das, je Grad mittlerer globaler Temperaturänderung während der letzten Eiszeit-Warmzeit-Pendelungen Verlagerung der Taiga um bis zu 200 km, bei den auftretenden größeren Temperaturänderungen von 4 Grad also einige Hundert Kilometer. Ökologen sagten bei jeder Anhörung der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages »Schutz der Erdatmosphäre« oder auch im *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), daß die natürliche Vegetation in einem Jahrhundert solche raschen Wanderungen von mehreren hundert km nicht mitmachen kann. Sie prophezeien eine Verarmung und Schwächung der großen natürlichen Vegetationszonen.

Eine dritte wesentliche Wirkung ist der Meeresspiegelanstieg. Es ist inzwischen klar, und es steht so auch im IPCC-Bericht, daß die großen Inlandeisgebiete zunächst also im nächsten Jahrhundert nicht die eigentlichen Beiträge zum Meeresspiegelanstieg liefern werden. Die Antarktis wird wahrscheinlich zunehmen; Grönland ist eher ein schwacher Abtaukandidat. Es bleiben dann zwei wesentliche Gründe für den Anstieg: Ausdehnung des Meerwassers und Schwund der Gebirgsgletscher. Die Ausdehnung des Meerwassers ist schon jetzt bei der beobachteten leichten Erwärmung um etwa 0,5 Grad in den vergangenen 100 Jahren für fast die Hälfte des beobachteten Anstiegs von 10–20 cm verantwortlich. Die Gebirgsgletscher schwinden in einer Weise wie nie zuvor (HÄBERLI et al. 1993). 54 global nicht gleichmäßig verteilte Gletscher mit jährlichen Massenbilanzmessungen schrumpften sich jüngst stark beschleunigend im Mittel um bis zu 90 cm pro Jahr.

Zum Meeresspiegelanstieg gibt es Projektionen der Hamburger Kollegen und die Schätzungen des *Intergovernmental Panel on Climate Change* nur für die Wärmeausdehnung. Die Wärmeausdehnung des Ozeans ist, je nachdem wo Wärmeenergie hineingemischt wird, sehr unterschiedlich; es gibt sozusagen Dellen und Buckel auf der Ozeanoberfläche. Obwohl im Szenario »Business as usual« durch Ausdehnung des Meerwassers der globale Meeresspiegelanstieg 20 cm bis 2100 beträgt, kann es sein, daß an Westeuropas Küsten dieser 40 cm erreicht, weil vor unserer Haustür, z. B. vor Schottland, ein Gebiet existiert, wo am Ende jedes Winters im März der Ozean bis zu etwa 700 m Tiefe durch die Konvektion neu durchmischt wird; angefacht von der Verdunstung in starken Stürmen, die in dieser Region regelmäßig auftreten.

Eine besonders wichtige Auswirkung von Klimaänderungen ist die Flucht der Menschen schon bei leichten Klimaänderungen. Ich behaupte nicht, daß die Saheldürre von den Menschen verursacht wurde. Aber sie ist ein Beispiel, wie empfindlich Gesellschaften sind. Bei etwa 20% Rückgang des Niederschlages in drei Jahrzehnten und einem halben Grad Erwärmung sind Millionen Menschen verhungert, und viele Millionen sind in die Nachbarländer geflohen. Ein Land wie die Elfenbeinküste mit zur Zeit etwa 12 Millionen Einwohnern beherbergt über 4 Millionen Flüchtlinge. Die Degradierung und der Verlust der Böden durch unsachgemäße Bewirtschaftung, verstärkt durch leichte Klimaänderungen sind ein zentrales Problem der Entwicklungsländer geworden.

Gibt es aber außer dem Gletscherschwund noch weitere Hinweise, daß die Erwärmung durch erhöhten Treibhauseffekt begonnen hat? Es gibt sie, aber sie liefern keine Beweise, denn die Veränderungen liegen *noch* im Rahmen der natürlichen Fluktuationen.

Das gilt für den Anstieg der bodennahen Weltmitteltemperaturen um 0,5 Grad seit 1880 ebenso wie für die Abkühlung der mittleren Stratosphäre. Aber auch die Verschiebung der Niederschlagszonen auf der nördlichen Erdhälfte – Trockenheit in den Subtropen, erhöhter Winterniederschlag in höheren mittleren Breiten – ist in Einklang mit Ergebnissen der gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modelle.

Wirkungen eines erhöhten Treibhauseffektes

Ich habe in meinem Vortrag viel abgeschwächt und relativiert. Aber einige Wirkungen eines erhöhten Treibhauseffektes sind schon jetzt sicher vorherzusagen: Es wird neue Wetterextreme geben, denn Empfindlichkeit gegenüber Klimaparametern drückt sich in Wetterextremen aus. Es stört den Hamburger nicht, wenn es im Mittel um 1 Grad wärmer geworden ist, aber es würde ihn treffen, wenn eine Sturmflut bei 5 cm höherem Meeresspiegel käme, die – wie das Seewetteramt es ausgerechnet hat – dem bei den 76er und 62er Fluten noch lange nicht erreichten Maximum näher läge, so daß die Deiche wieder brechen. Das gleiche gilt auch für jeden Wirbelsturm in den Tropen. Der wichtigste Punkt aber ist, daß alle betroffen sind, auch diejenigen, welche nicht die Verursacher waren. Dazu gebe ich eine Diskussion aus dem *Intergovernmental Panel on Climate Change* wieder. Der damalige sowjetische Delegierte sprach davon, man möge doch auch einmal leichten Meeresspiegelanstieg und etwas mehr Weizen in Sibirien gegeneinander abwägen. Daraufhin sagte der Delegierte der Malediven, er möchte diese Versammlung darauf hinweisen dürfen, daß in seinem Land der höchste Berg 3 m über dem Meeresspiegel liegt und daß bei einem Meeresspiegelanstieg von wenigen Dezimetern die Trinkwasserversorgung versalzen und damit die Insel unbewohnbar werde, es sei denn, man nehme, wie die Niederländer es für die Malediven ausrechneten, 38% des Bruttosozialproduktes dieses Landes und stecke sie in den Küstenschutz.

Die Klimakonvention

Diese Überlegungen führten mit zur Klimakonvention (BMU 1993), die ein ganz hehres Ziel hat, das in der Diskussion dazu im Vorfeld der Konferenz von Rio de Janeiro vollkommen untergegangen ist. Die Stabilisierung der Konzentrationen der Treibgase ist danach innerhalb einer Zeitspanne zu erreichen, die drei Bedingungen erfüllt, daß nämlich 1. die Ökosysteme ihre natürliche Anpassungsfähigkeit nicht

verlieren, daß 2. die Ernährung der Menschen generell nicht gefährdet ist und daß 3. eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung möglich bleibt. Hinter diesen drei Nebenbedingungen versteckt sich eine große Forschungsanstrengung. Wir wissen sehr wenig, was die Aussage bedeutet, die Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme soll erhalten bleiben. Aber was die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen bedeuten würde, wissen wir schon. Wir können es umrechnen in Emissionsminderungen. Diese hat viel mit der Lebensdauer der entsprechenden Treibhausgase zu tun. Ich nenne die Zahlen: CO₂ müßte um 60 bis 70% reduziert werden, damit heute Stabilisierung der Konzentration eintritt; Methan nur um 15 bis 20%, weil es ein Gas ist, das nur etwa 10 Jahre Verweildauer in der Atmosphäre hat; Distickstoffoxid müßte um mindestens 80% reduziert werden, weil es 150 Jahre Verweilzeit in der Atmosphäre hat, gleichzeitig ist es das wichtigste Gas beim Abbau des Ozons in der Stratosphäre. Die meisten FCKW müßten um mehr als 80% reduziert werden, damit konstante Konzentrationen kommen.

Das Ziel der Klimakonvention heißt damit, bis zum Jahre 2050 Abschied von fossilen Energieträgern als wesentlichste Energiequelle zu nehmen. 154 Nationen haben in Rio unterschrieben, 166 haben bis jetzt unterzeichnet, viele ohne die wirklichen Konsequenzen gespürt zu haben. Es wird daher äußerst schwierig werden, in der Umsetzung dieser Konvention voranzukommen. Es wird wohl so bleiben, daß die Bundesrepublik und andere europäische Nationen, so wie bisher, eine gewisse Vorreiterrolle für die Hauptverursacher, die Industrienationen, spielen müssen bei der Effizienzrevolution, d. h. bei der Reduktion der Durchflußraten, denn Ingenieurslösungen – so hoch wir die Ingenieure schätzen – am System Erde gibt es nicht. Wir wissen zu wenig, um jetzt SO₂ in die Stratosphäre zur Aufhellung des Planeten blasen zu dürfen oder Eisen in den Pazifik, um das Phytoplankton dort etwas besser zu füttern, so daß etwas mehr Kohlenstoff in die Tiefsee gerät. Die hochentwickelten Länder müssen mit der Effizienzsteigerung starten, damit andere bei der wirtschaftlichen Entwicklung die Spartechniken übernehmen können. Ich bin sehr zuversichtlich, daß wir bei der ersten Vertragsstaatenkonferenz zur Klimakonvention, die 1995 in Deutschland stattfinden wird, einen Schritt in Richtung eines ersten kleinen CO₂-Minderungsprotokolls machen werden, das in den jährlichen Konferenzen zur Konvention bei neuen wissenschaftlichen Befunden und der Erkenntnis oft wohlthuender Wirkung für die Wirtschaft verschärft wird.

Literatur

- BMU: Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro. Dokumente: Klimakonvention, Konvention über biologische Vielfalt, Rio-Deklaration, Wald-erklärung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 1993
- CLAUSSEN, M., and ESCH, M.: Biomes computed from simulated climatologies. Hamburg: Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bericht Nr. 89 (1992)
- CUBASCH, U., HASSELMANN, K., HÖCK, H., MAIER-REIMER, E., MIKOLAJEWICZ, U., SANTER, B. D., and SAUSEN, R.: Time dependent greenhouse warming computations with coupled ocean-atmosphere model. *Climate Dynamics* 8, 55–69 (1992)
- Deutscher Bundestag: *Climate Change – A Threat to Global Development*. Bonn: Economica Verlag 1992
- HAEBERLI, W., HERREN, E., and HOELZLE, M.: *Glacier Mass Balance Bulletin No. 2 1991/1992*, IAHS-UNEP-UNESCO. Teufen: Kunz-Druck 1993
- HASSELMANN, K., SAUSEN, R., MAIER-REIMER, E., and VOSS, R.: On the cold start problem in transient simulations with coupled atmosphere-ocean models. Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg, Bericht Nr. 83 (1992)

- RIELAND, M., and RASCHKE, E.: Diurnal variability of the Earth radiation budget: Sampling requirements, time integration aspects and error estimates for the Earth Radiation Budget Experiment (ERBE). *Theor. Appl. Climatol.* 44, 9–24 (1991)
- SCHLÜSSEL, P., and EMERY, W. J.: Atmospheric water vapour over oceans from SSM/I measurements. *Int. Remote Sensing* 11, 753–766 (1990)
- WMO/UNEP; HOUGHTON, J. T., JENKINS, G. J., and EPHRAUMS, J. J. (Eds.): *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment.* Cambridge: University Press 1990
- WMO/UNEP; HOUGHTON, J. T., CALLANDER, B. A., and VARNEY, S. J.: *Climate Change, 1992, The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment.* Cambridge: University Press 1992

Prof. Dr. Hartmut GRASSL
MPI für Meteorologie
Bundesstraße 55
D-20146 Hamburg