

Klima

Vorträge im Wintersemester 1992/93

Heidelberger Verlagsanstalt

Sammelband der Vorträge des STUDIUM GENERALE der
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg im Wintersemester 1992/93

Klima

Vorträge im Wintersemester 1992/93



Die Deutsche Bibliothek – CIP Einheitsaufnahme

Klima: Vorträge im Wintersemester 1992/93; [Sammelband der Vorträge des Studium Generale der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg] / [Hrsg.: Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg]. – Heidelberg: Heidelbergerverl.-Anst., 1993

(Studium Generale an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg)

ISBN 3-89426-058-0

NE: Universität <Heidelberg> / Studium Generale

Photomechanische Wiedergabe, auch von Teilen des Buches, nur mit ausdrücklicher Genehmigung durch den Verlag.

Herausgeber: Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Verlag: Heidelbergerverlagsanstalt und Druckerei GmbH, Heidelberg

Druck und buchbinderische Verarbeitung: HVA Grafische Betriebe, Heidelberg

Umschlaggestaltung: Bernhard Kreger

VORWORT

Die Menschheit ist dabei, ihren Lebensraum, den Planeten Erde, unfreiwillig im globalen Maßstab zu verändern. Während früher Umweltverschmutzung und -zerstörung durch menschliche Einwirkungen nur die am jeweiligen Ort lebende Bevölkerung betraf, werden heute Kontinente und die Erde als ganze auf unabsehbare Zeit in Mitleidenschaft gezogen.

Die Studium-Generale-Vorträge im Wintersemester 1992/93 hatten eine Bestandsaufnahme und kritische Diskussion des derzeitigen Wissensstandes über die zivilisationsbedingten Änderungen des Klimas zum Ziel. Neben den naturwissenschaftlichen Ergebnissen über die Rückkoppelung zwischen der Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre und dem globalen Klima wurden die sich abzeichnenden Auswirkungen auf den menschlichen Lebensraum, die Entwicklung und das Selbstverständnis von Sozialsystemen, die Gesundheit der Menschen und auf die biologische Evolution behandelt.

Den Referenten sei an dieser Stelle noch einmal dafür gedankt, daß sie - mit einer Ausnahme - die schriftliche Fassung ihrer Vorträge für den Abdruck zur Verfügung gestellt haben.

Rektorat

Das Klimamodell - zu den Grundlagen des Klimasystems

Prof. Dr. Klaus Hasselmann, Max-Planck-Institut für Meteorologie,
Hamburg

1. Klima und Wetter

Als Klimaforscher wird man häufig gefragt: Wie sicher ist eigentlich die von Klimaforschern vorhergesagte globale Erwärmung? Wie können Klimaforscher den Mut haben, die Klimaänderung infolge der zunehmenden Treibhausgaskonzentrationen für die nächsten Dekaden oder sogar das nächste Jahrhundert vorherzusagen, wenn die Meteorologen das Wetter doch nicht einmal für zehn Tage voraussagen können? Die Antwort ist natürlich: Klima ist eben nicht Wetter. Unter Klima verstehen wir die statistische Beschreibung des Wetters, gemittelt über einen Zeitraum - je nach Fragestellung - von einigen Wochen bis mehreren Jahrzehnten oder sogar Jahrhunderten. Beim Wetter will man dagegen die aktuelle Verteilung der atmosphärischen Temperaturen, Bewölkung, Niederschläge, Wind und andere Details der augenblicklichen atmosphärischen Zirkulation vorhersagen. Die Berechnung der Entwicklung eines bestimmten Wettersystems - etwa der Zugbahn und Intensität eines Tiefs - ist eine völlig andere Frage als z.B. die Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten der Extremwerte der Temperaturen oder Mittelwerte der Niederschläge über einen Zeitraum von einigen Wochen oder länger. Mathematisch gesehen stellt die Vorhersage des Wetters ein *Anfangswertproblem* dar, und zwar für ein instabiles deterministisches System, die Berechnung des Klimas dagegen ein *Randwert- oder Randwert-Anfangswert-Problem* für ein statistisch stabiles System.

Den grundsätzlichen Unterschied dieser beiden Problemstellungen kennen wir aus der statistischen Mechanik. Die Temperatur eines Gases wird bekanntlich durch die mittlere kinetische Energie der Gasmoleküle bestimmt. Betrachtet man ein größeres, ungleichmäßig erwärmtes Gasvolumen, so könnte man nun den thermischen Ausgleichsvorgang innerhalb des Gases dadurch berechnen, daß man die Bewegungen sämtlicher Moleküle des Gases, die wir uns zum Anfangszeitpunkt als bekannt vorgegeben denken, verfolgt. Abgesehen von dem nicht zu bewältigenden Rechenaufwand würden wir bei dieser Vorgehensweise aber zunächst schnell feststellen, daß die Rechnungen instabil sind: Kleine Abweichungen in den Anfangslagen und Geschwindigkeiten der Teilchen führen nach einigen Stößen zu völlig unterschiedlichen Bahnen der einzelnen Moleküle. Das System ist deterministisch nicht über einige Stoßvorgänge hinaus berechenbar. Dies entspricht der Situation bei der Wettervorhersage:

Auch hier kann man die Entwicklung einzelner Wettersysteme wegen der inhärenten Instabilität des Systems gegenüber kleinen Änderungen der Anfangszustände nur über eine begrenzte Zeit zuverlässig berechnen. Wiederum ist aber bekannt, daß der Temperatúrausgleich in einem Gas nach durchaus stabilen Gesetzen abläuft. Obwohl wir mit unserer Rechenmethode die Trajektorien der Moleküle im einzelnen nicht verfolgen können, würde sie dennoch nach entsprechender statistischer Mittelung den Vorgang des Temperatúrausgleiches im Gas richtig wiedergeben. Sie ist also für statistische Vorhersagen eine im Prinzip durchaus taugliche Rechenmethode.

Natürlich würde kein Physiker auf die Idee kommen, den Temperatúrausgleich tatsächlich auf diese Weise zu berechnen. Er würde vielmehr die theoretischen Methoden der statistischen Mechanik heranziehen, um gleich zu einer geschlossenen Gleichung - der Wärmeleitungsgleichung - für die ihn allein interessierende mittlere Größe, die Temperatur, zu gelangen, und dann diese wesentlich einfachere Gleichung lösen.

Der Klimaforscher würde gern genauso vorgehen: Statt den Ablauf der einzelnen Wettervorgänge mit hochauflösenden Wettermodellen in allen Einzelheiten zu berechnen, würde er am liebsten einfachere Gleichungen für die Entwicklung der ihn interessierenden mittleren Größen aufstellen. Leider ist dies aber wegen der starken Koppelungen innerhalb des Klimasystems nicht möglich. Das Klimasystem gehört zur Klasse der stark nichtlinearen heterogenen Systeme mit vielen Freiheitsgraden. Auf diese Systeme - das klassische Beispiel ist die Turbulenz - sind die üblichen Reduktionsmethoden der statistischen Mechanik, die schwache Koppelungen innerhalb eines homogenen Ensembles gleichartiger Komponenten voraussetzen, nicht anwendbar. Der Klimaforscher befindet sich somit in der etwas unglücklichen Lage des Physikers, der versuchen muß, den Temperatúrausgleich innerhalb eines Gases durch Berechnung der Bewegungen sämtlicher Gasmoleküle zu ermitteln. Daß Klimamodellierer ständig nach immer größeren Rechnern verlangen, wird hierdurch verständlich.

2. Energiebilanz des Klimasystems

Das Klimasystem stellt eine riesige, von der Sonne angetriebene Wärmekraftmaschine dar (Abb. 1). Die auf die Erde einfallende Sonnenstrahlung beträgt im Mittel 344 Watt pro Quadratmeter der Erdoberfläche. Etwa 30 % dieser einfallenden Strahlung wird reflektiert, hauptsächlich durch Wolken, der restliche Anteil, d. h. etwa 240 W/m^2 , wird absorbiert, umverteilt und schließlich als Wärmestrahlung wieder ins Weltall zurückgestrahlt. Bei einem sogenannten *schwarzen Körper* (einem Körper, der alle Strahlung völlig absorbiert und wieder ausstrahlt) würde eine Wärmestrahlung von 240 W/m^2 einer Temperatur von etwa -20° C entsprechen.

Glücklicherweise ist die Erde kein schwarzer Körper. Sie ist nämlich von einer Gashülle umgeben, die die einfallende Sonnenstrahlung weitgehend durchläßt, aber die ausgehende Wärmestrahlung einfängt und wieder zurückstrahlt. Die Gashülle wirkt somit wie eine wärmende Decke oder, genauer, wie das Glas eines Treibhauses. Die Atmosphäre enthält

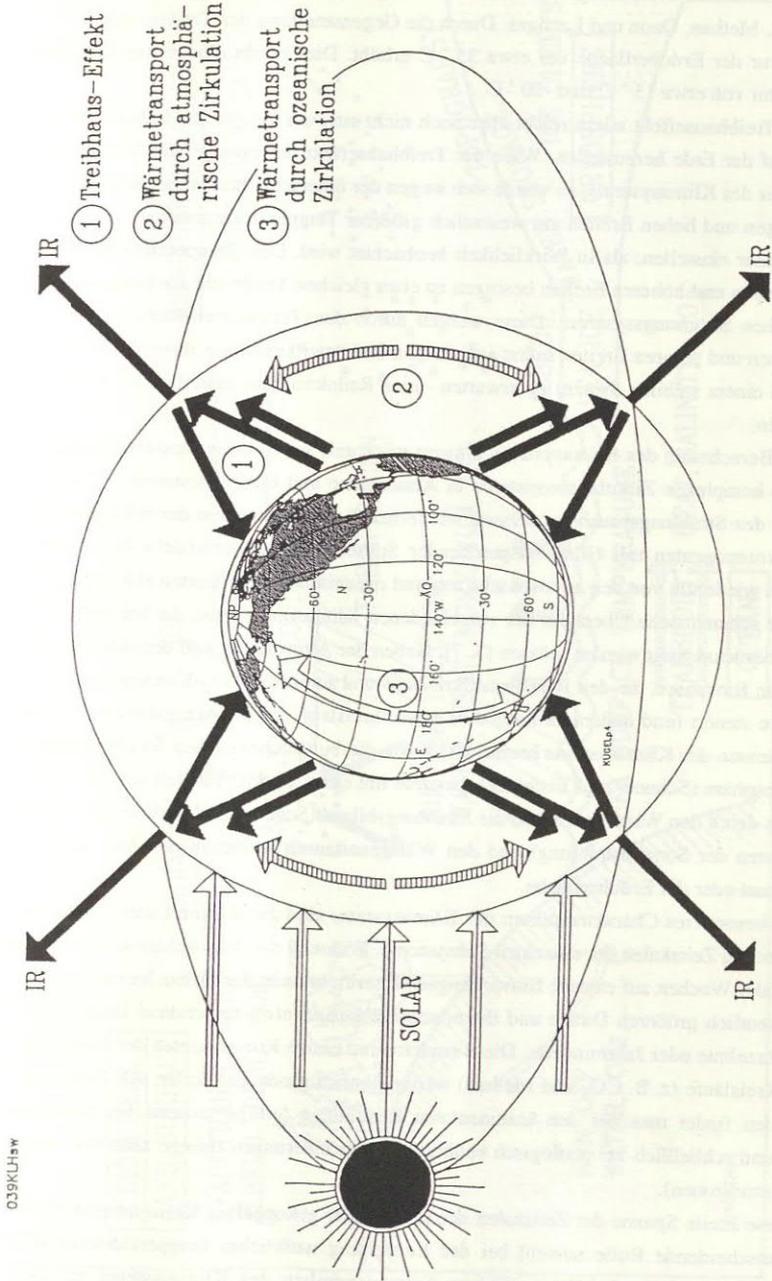


Abb. 1: Wärmetransporte im Klimasystem.

039KUH1W

mehrere natürliche Treibhausgase, in der Reihenfolge ihrer Wichtigkeit: Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Ozon und Lachgas. Durch die Gegenstrahlung der Treibhausgase wird die Temperatur der Erdoberfläche um etwa 35°C erhöht. Dies ergibt eine erträgliche mittlere Temperatur von etwa 15°C statt -20°C .

Der Treibhauseffekt allein reicht aber noch nicht aus, um ein für das Leben erträgliches Klima auf der Erde herzustellen. Wäre der Treibhauseffekt der einzige wirksame Regelmechanismus des Klimasystems, so würde sich wegen der unterschiedlichen Sonneneinstrahlung in niedrigen und hohen Breiten ein wesentlich größerer Temperaturunterschied zwischen Pol und Äquator einstellen, als in Wirklichkeit beobachtet wird. Den Temperatureausgleich zwischen Tropen und höheren Breiten besorgen zu etwa gleichen Teilen die atmosphärischen und ozeanischen Strömungssysteme. Diese werden durch den Temperaturunterschied zwischen den Tropen und polaren Breiten selbst angetrieben und bewirken durch ihren Wärmetransport - wie bei einem stabilen System zu erwarten - eine Reduktion des antreibenden Temperaturgradienten.

Zur Berechnung des Klimasystems müssen wir somit sowohl den Strahlungshaushalt als auch die komplexen Zirkulationssysteme in Atmosphäre und Ozean bestimmen. Für die Ermittlung des Strahlungshaushalts müssen wir ferner die Konzentration der relevanten Treibhausgaskomponenten mit Hilfe entsprechender Spurenstoffkreislaufmodelle berechnen, die ihrerseits wiederum von den atmosphärischen und ozeanischen Transporten abhängen. Abb. 2 gibt eine schematische Übersicht der verschiedenen Klimasubsysteme, die bei diesen Rechnungen berücksichtigt werden müssen [3, 7]. Neben der Atmosphäre und dem Ozean gehören hierzu die Biosphäre, die den Kohlenstoffkreislauf und somit die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre steuert (und außerdem noch den Wasserkreislauf, die Strahlungsbilanz und andere Komponenten des Klimasystems beeinflusst) sowie die biogeochemischen Stoffkreisläufe und die Kryosphäre (Schnee- und Eisfelder). Letztere übt einen starken Einfluß auf das Klimasystem aus durch den Wasserkreislauf, die Strahlungsbilanz (Schnee- und Eisflächen sind starke Reflektoren der Sonnenstrahlung) und den Wärmeaustausch zwischen der Atmosphäre und dem Ozean oder der Erdoberfläche.

Ein besonderes Charakteristikum des Klimasystems sind die starken Unterschiede in den dynamischen Zeitskalen der einzelnen Subsysteme. Während die Atmosphäre sich in wenigen Tagen oder Wochen auf externe Einwirkungen einstellt, braucht der Ozean hierzu, wegen seiner wesentlich größeren Dichte und thermischen Trägheit, etwa tausendmal länger, d. h. einige Jahrzehnte oder Jahrhunderte. Die Biosphäre und einige Komponenten der biogeochemischen Kreisläufe (z. B. CO_2 und Methan) weisen ähnlich große Zeitskalen auf. Noch längere Zeitskalen findet man bei den kontinentalen Eisschilden (einige tausend bis zehntausend Jahre) und schließlich bei geologisch bedingten Klimaänderungen (einige zehn bis Hunderte von Jahrmillionen).

Diese breite Spanne der Zeitskalen der miteinander gekoppelten Klimasubsysteme spielt eine entscheidende Rolle sowohl bei der Entstehung natürlicher langperiodischer Klimaschwankungen als auch beim zeitlichen Antwortverhalten des Klimasystems auf externe

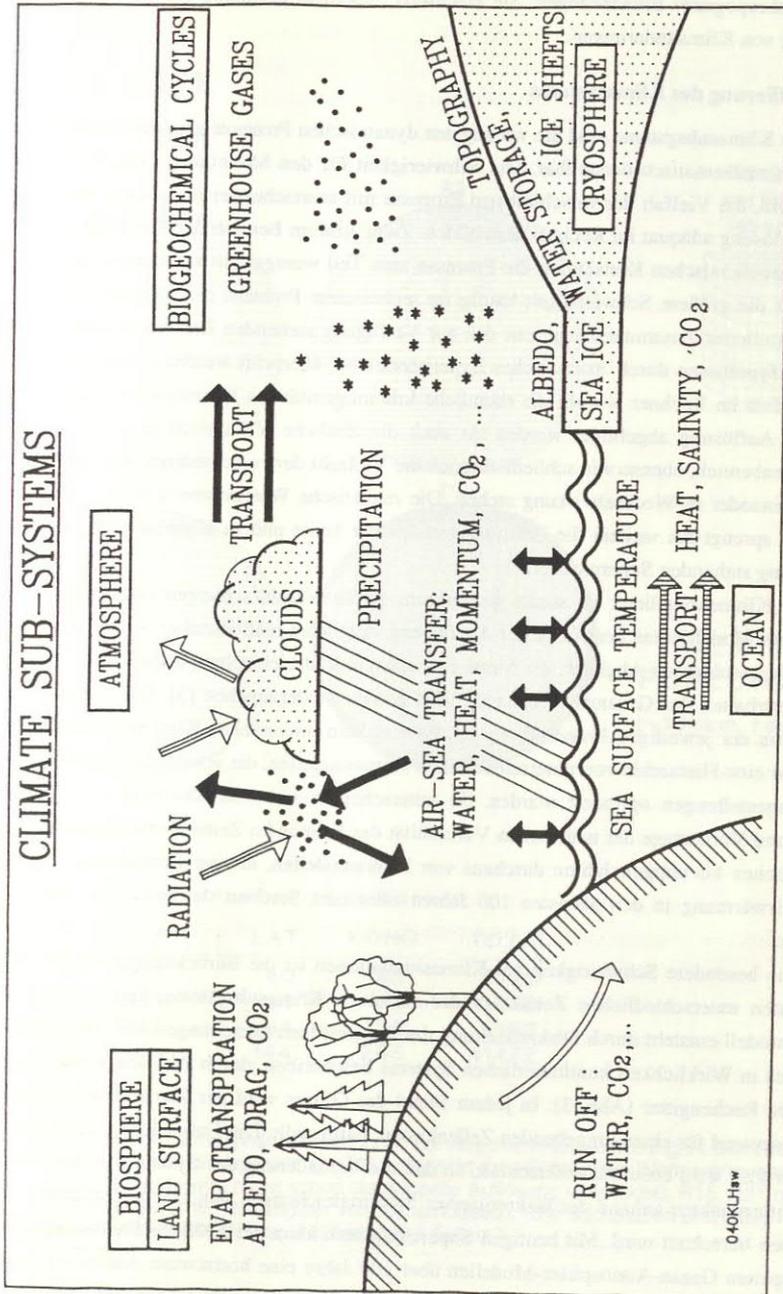


Abb. 2: Schematische Darstellung der wichtigsten Subsysteme und Wechselwirkungen im Klimasystem.

(z. B. anthropogene) Einwirkungen. Sie erschwert außerdem erheblich die numerische Berechnung von Klimaänderungen.

3. Modellierung des Klimasystems

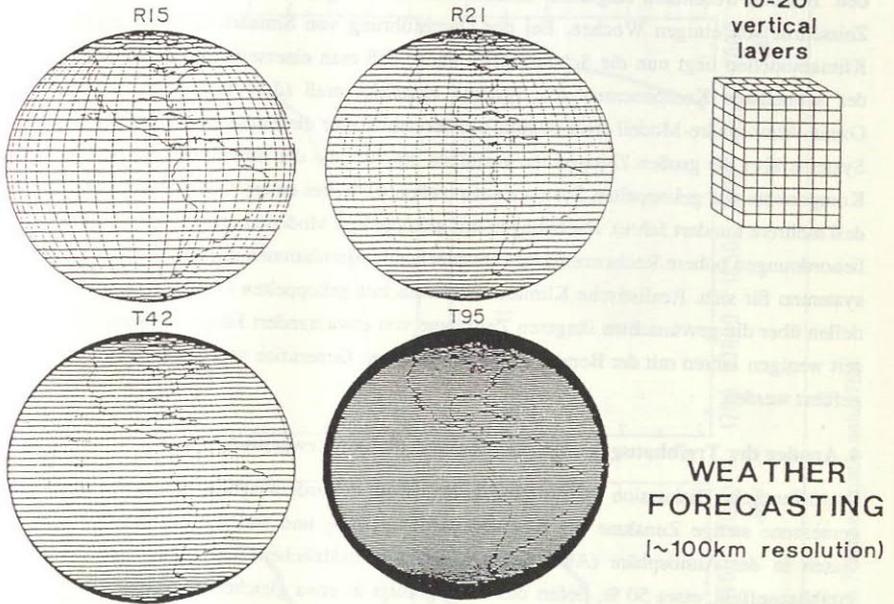
Für viele Klimasubsysteme sind die wichtigsten dynamischen Prozesse grundsätzlich bekannt und auch mathematisch darstellbar. Die Schwierigkeit für den Modellierer besteht in erster Linie darin, die Vielfalt der verschiedenen Prozesse mit ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung adäquat im Rechner abzubilden. Zwar sind im Bereich der Biosphäre und bei den biogeochemischen Kreisläufen die Prozesse zum Teil weniger gut verstanden, aber auch hier liegt die größere Schwierigkeit häufig im technischen Problem der adäquaten Wiedergabe postulierter Zusammenhänge mit den zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten, damit die Hypothesen durch 'numerisches Experimentieren' überprüft werden können. Es müssen nämlich im Rechner sowohl die räumliche Inhomogenität des Klimasystems mit ausreichender Auflösung abgebildet werden als auch die zeitliche Variabilität in einem breiten Zeitskalenbereich, ebenso wie schließlich noch die Vielzahl der verschiedenen Komponenten, die miteinander in Wechselwirkung stehen. Die realistische Wiedergabe aller dieser Eigenschaften sprengt bei weitem die Leistungsgrenzen der heute und in absehbarer Zukunft zur Verfügung stehenden Superrechner.

Der Klimamodellierer ist somit gezwungen, starke Vereinfachungen einzuführen. Die Kunst des Modellierens besteht in der Auffindung möglichst realitätsnaher Vereinfachungen sowie im geschickten Abgleich der Vereinfachungsgrade der einzelnen Subsysteme, um das Systemverhalten des Gesamtsystems möglichst getreu wiederzugeben [3]. Dieser Ausgleich hängt von der jeweiligen Fragestellung ab. Es gibt kein universelles Klimamodell, sondern vielmehr eine Hierarchie von unterschiedlichen Klimamodellen, die jeweils für unterschiedliche Fragestellungen optimiert wurden. So unterscheiden sich Klimamodelle zur Untersuchung und Vorhersage der natürlichen Variabilität des Klimas im Zeitskalenbereich von einigen Wochen bis einigen Jahren durchaus von Klimamodellen, die zur Berechnung der globalen Erwärmung in den nächsten 100 Jahren oder zum Studium der Eiszeiten eingesetzt werden.

Eine besondere Schwierigkeit bei Klimasimulationen ist die Berücksichtigung der oben erwähnten unterschiedlichen Zeitskalen der einzelnen Klimasubsysteme. Ein numerisches Klimamodell entsteht durch Diskretisierung der dynamischen Gleichungen, die die Entwicklung des in Wirklichkeit kontinuierlichen Systems beschreiben, durch Abbildung auf ein geeignetes Rechengitter (Abb. 3). In jedem Punkt des Gitters wird der Zustand des Systems, stellvertretend für einen umgebenden Zellenkasten, dargestellt. Die Entwicklung des Systems mit der Zeit wird ebenfalls diskretisiert, so daß die Veränderung des Systems an den einzelnen Gitterpunkten anhand der diskretisierten Systemgleichungen von einem Zeitschritt zum nächsten berechnet wird. Mit heutigen Supercomputern kann bei Klimahochrechnungen mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen über 100 Jahre eine horizontale Auflösung in der Größenordnung von 500 km bei einer vertikalen Auflösung von 20 Höhenschichten erzielt

CLIMATE

(~500km resolution)



number of gridpoints

grid	LAT.	LONG.	TOTAL
R15	40	48	1920
R21	54	64	3456
T42	64	128	8192
T95	144	288	41472

Abb. 3: Rechengitter atmosphärischer Modelle bei verschiedenen Auflösungen. Die Tabelle gibt die Anzahl Gitterpunkte an. T95 entspricht dem Gitter eines Wettervorhersagemodells (heute wird meist schon die doppelte Auflösung verwendet), R15, R21 oder T42 sind typische Rechengitter von Klimamodellen. (Die Buchstaben und Ziffern kennzeichnen die Art bzw. Auflösung des Gitters.)

werden. (Bei der Wettervorhersage über wesentlich kürzere Zeiträume von maximal 10 Tagen kann man sich eine deutlich höhere Auflösung von 50 km leisten). Der Rechenzeitschritt muß bei diesen Rechnungen der räumlichen Auflösung und der internen Dynamik des jeweiligen Systems angepaßt werden. Für die sich schnell verändernde Atmosphäre müssen z. B. die aufeinanderfolgenden Zustände des Systems etwa im halbstündigen Abstand berechnet werden. Bei den wesentlich langsamer ablaufenden Änderungen im Ozean genügt dagegen ein Zeitschritt von einigen Wochen. Bei der Durchführung von Simulationen mit gekoppelten Klimamodellen liegt nun die Schwierigkeit darin, daß man einerseits den kurzen Zeitschritt der schnellsten Komponenten des Systems einhalten muß (d. h. bei einem gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modell etwa 30 min.), andererseits aber die Entwicklung des gekoppelten Systems über die großen Zeitspannen verfolgen möchte, die der Einstellzeit der langsamsten Komponente des gekoppelten Systems entsprechen (d. h. bei einem Ozean-Atmosphäre-Modell mehrere hundert Jahre). Rechnungen mit gekoppelten Modellen erfordern somit um Größenordnungen höhere Rechenzeiten als entsprechende Simulationen mit den einzelnen Systemen für sich. Realistische Klimasimulationen mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen über die gewünschten längeren Zeiträume von etwa hundert Jahren konnten daher erst seit wenigen Jahren mit der Bereitstellung der heutigen Generation von Superrechnern durchgeführt werden.

4. Anstieg der Treibhausgaskonzentration und globale Erwärmung

Die öffentliche Diskussion um die globale Erwärmung wurde ausgelöst durch die seit 1958 gemessene stetige Zunahme der Konzentration von CO_2 und anderen treibhauswirksamen Gasen in der Atmosphäre (Abb. 4). Den größten zusätzlichen Beitrag zum zusätzlichen Treibhauseffekt, etwa 50 %, liefert das CO_2 , gefolgt in etwa gleichen Anteilen von Methan und Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) (Abb. 5). Den stärksten Anstieg verzeichnen die FCKWs, ein in der Natur nicht vorkommendes Kunstprodukt des Menschen [4]. Der FCKW-Anstieg stellt nicht nur wegen seines Treibhausbeitrages, sondern insbesondere, weil FCKWs über die photochemische Freisetzung von Chlor das Ozon in der Stratosphäre katalytisch abbaut, eine akute Belastung von Klima und Umwelt dar. Obwohl zu erwarten ist, daß die Produktion von FCKWs aufgrund internationaler Abmachungen in wenigen Jahren weitgehend eingestellt sein wird, muß wegen des langsamen Eindringens der FCKWs in die Stratosphäre (5 - 10 Jahre) und des noch wesentlich langsameren Abbaus der FCKWs in der Stratosphäre (40 - 100 Jahre) mit einer stark verzögerten Abnahme der stratosphärischen FCKW-Konzentrationen bis weit in das nächste Jahrhundert hinein gerechnet werden. Neben den in den Abb. 4 und 5 gezeigten, aus externen Quellen stammenden Treibhausgasen nimmt auch der Wasserdampf, das wichtigste Treibhausgas, infolge erhöhter Verdunstung der Ozeane bei einer globalen Erwärmung zu. Durch diesen sogenannten positiven Rückkopplungseffekt wird die Netto-Treibhauswirkung der übrigen Treibhausgase noch um einen Faktor 2 - 3 verstärkt.

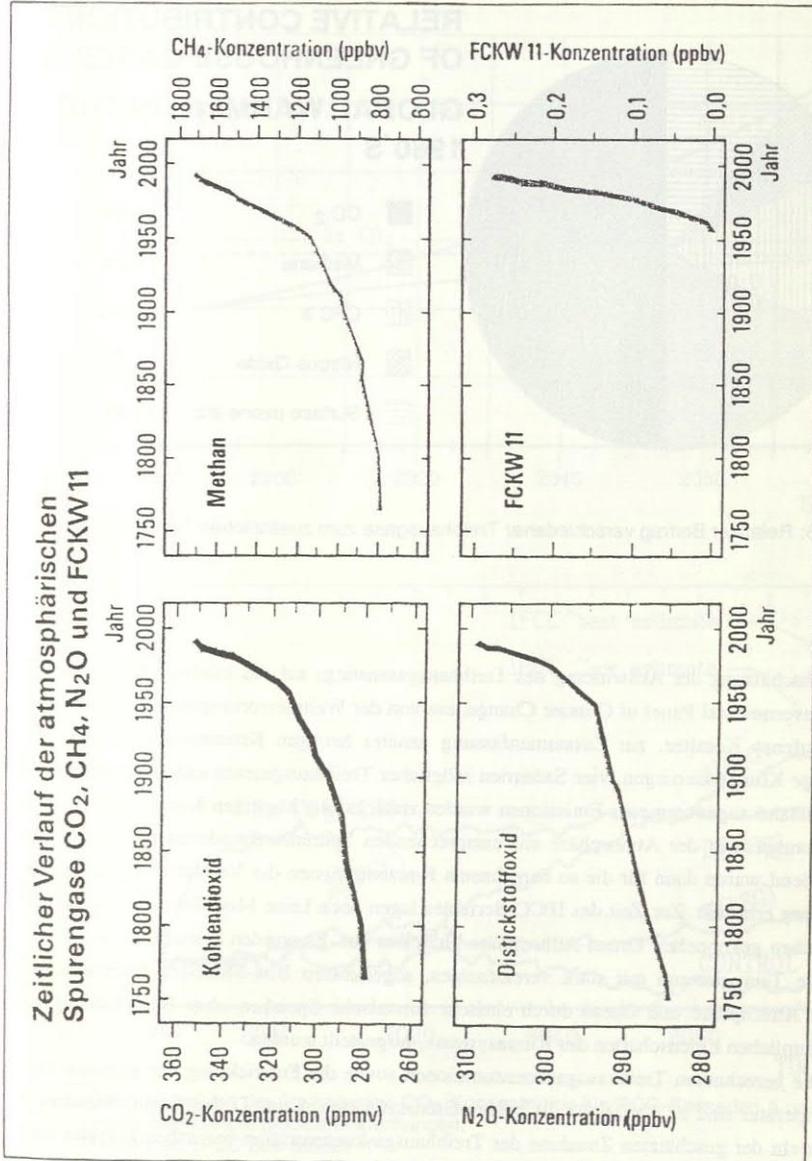


Abb. 4: Anstieg der Konzentration der wichtigsten Treibhausgase seit 1750.

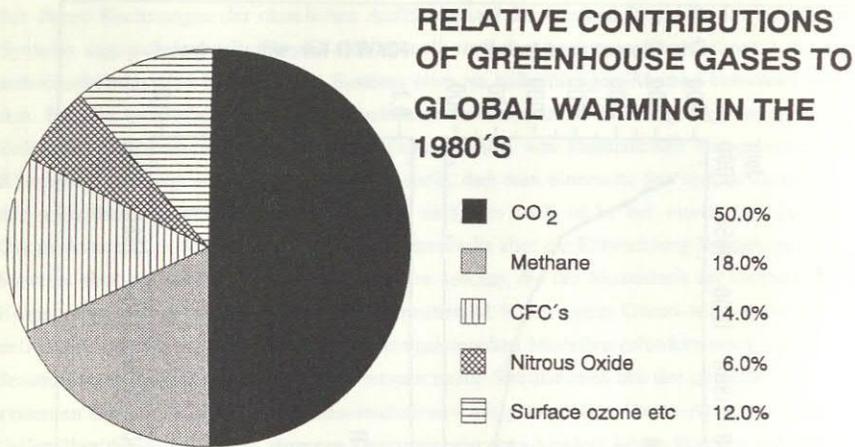


Abb. 5: Relativer Beitrag verschiedener Treibhausgase zum zusätzlichen Treibhauseffekt.

Zur Abschätzung der Auswirkung des Treibhausgasanstiegs auf das künftige Klima hat das Intergovernmental Panel of Climate Change, ein von der Weltmeteorologischen Organisation einberufenes Komitee, zur Zusammenfassung unserer heutigen Kenntnisse über mögliche künftige Klimaänderungen, vier Szenarien möglicher Treibhausgasentwicklungen untersucht [7]. Anhand angenommener Emissionen wurden zunächst die künftigen Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre mit entsprechenden Spurenstoffmodellen berechnet. Anschließend wurde dann für die so berechneten Konzentrationen der Verlauf der globalen Erwärmung ermittelt. Zur Zeit des IPCC-Berichtes lagen noch keine Modellrechnungen mit realistischen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen vor. Es wurden deshalb nur global gemittelte Temperaturen mit stark vereinfachten, sogenannten Box-Modellen berechnet, bei denen Atmosphäre und Ozean durch einfache thermische Speicher, ohne Berücksichtigung der räumlichen Eigenschaften des Klimasystems, dargestellt wurden.

Die berechneten Treibhausgaskonzentrationen sowie die Entwicklung der globalen Mitteltemperatur sind in Abb. 6 für die beiden Grenzszenarien A und D dargestellt. Szenario A entspricht der geschätzten Zunahme der Treibhausgaskonzentration bei unbeschränkter Entwicklung der Wirtschaft (*business as usual*), Szenario D (*Draconian measures*) der Entwicklung bei starker Einschränkung der Treibhausgasemissionen: Einfrieren auf das Niveau von 1990 bis zum Jahre 2000 mit anschließender Abnahme der Emission auf etwa die Hälfte des

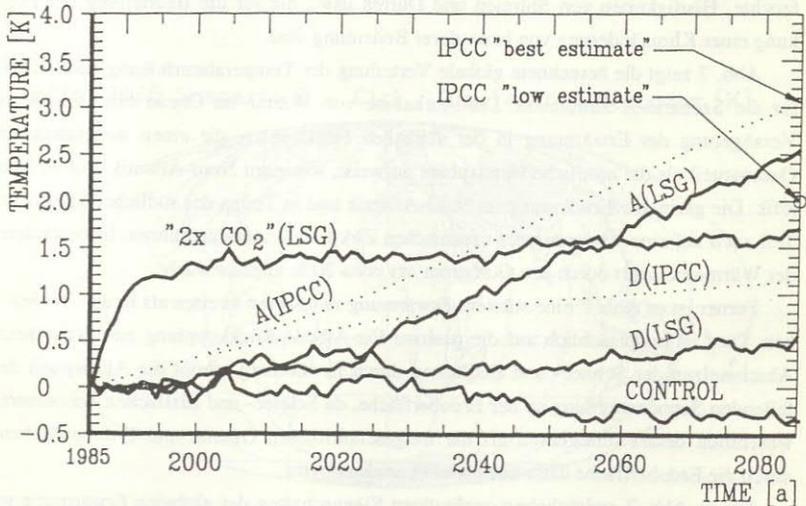
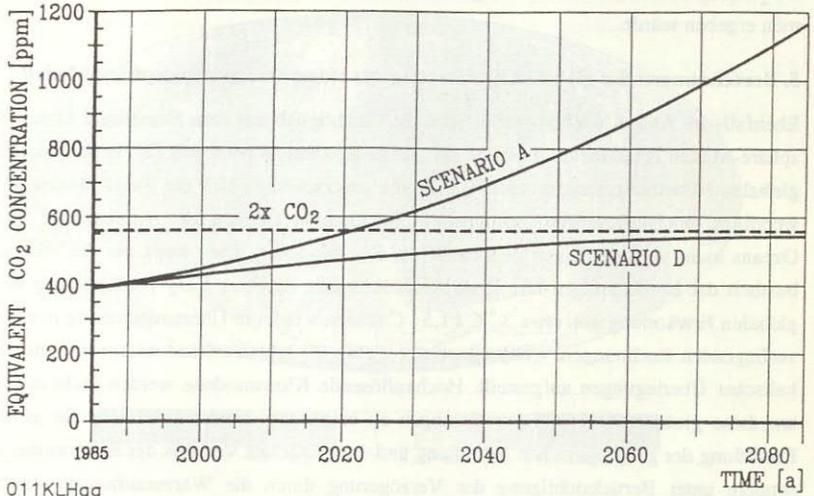


Abb. 6: Oben: Zunahme der äquivalenten CO_2 -Konzentration für IPCC-Szenarien A und D.

Unten: Berechnete globale Erwärmungen.

Gestrichelt: IPCC Box-Modell

Ausgezogen: Hamburger Ozean-Atmosphäre-Modell (LSG). Ebenfalls aufgetragen ist die berechnete Erwärmung bei einer plötzlichen Verdoppelung der äquivalenten CO_2 -Konzentration im Jahre 1985 relativ zur Konzentration in den 50er Jahren.

1990er Niveaus innerhalb von 50 Jahren. Der summierte Treibhauseffekt aller Treibhausgase wird dabei durch die sogenannte äquivalente CO_2 -Konzentration ausgedrückt, d. h. durch die CO_2 -Konzentration, die etwa die gleiche Treibhauswirkung wie alle Treibhausgase zusammen ergeben würde.

5. Berechnungen der globalen Erwärmung mit einem Ozean-Atmosphäre-Modell

Ebenfalls im Abb. 6 wiedergegeben sind die nachträglich mit dem Hamburger Ozean-Atmosphäre-Modell berechneten Anstiege der globalen Mitteltemperaturen [2]. In den berechneten globalen Mitteltemperaturen nach 100 Jahren unterscheiden sich die Simulationen mit aufwendigen hochauflösenden gekoppelten Zirkulationsmodellen der Atmosphäre und des Ozeans nicht wesentlich von den einfachen Box-Modellen. Dies weist auf die relative Robustheit der Berechnungen hin. Erste Abschätzungen, daß eine CO_2 -Verdoppelung zu einer globalen Erwärmung von etwa $3^\circ\text{C} \pm 1,5^\circ\text{C}$ führen würde, in Übereinstimmung mit den hier vorliegenden Rechnungen, wurden bereits vor etwa 20 Jahren anhand relativ einfacher physikalischer Überlegungen aufgestellt. Hochauflösende Klimamodelle werden nicht eingesetzt, um diese globalen Überschlagsrechnungen zu bestätigen, sondern vielmehr zur genaueren Ermittlung der geographischen Verteilung und des zeitlichen Verlaufs der Erwärmung, insbesondere unter Berücksichtigung der Verzögerung durch die Wärmeaufnahme durch den Ozean. Ferner liefern Zirkulationsmodelle wichtige weitere Daten, wie Niederschlag, Bodenfeuchte, Häufigkeiten von Stürmen und Dürren usw., die für die Beurteilung der Folgewirkung einer Klimaänderung von besonderer Bedeutung sind.

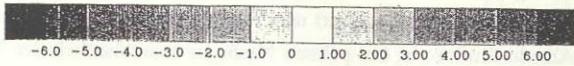
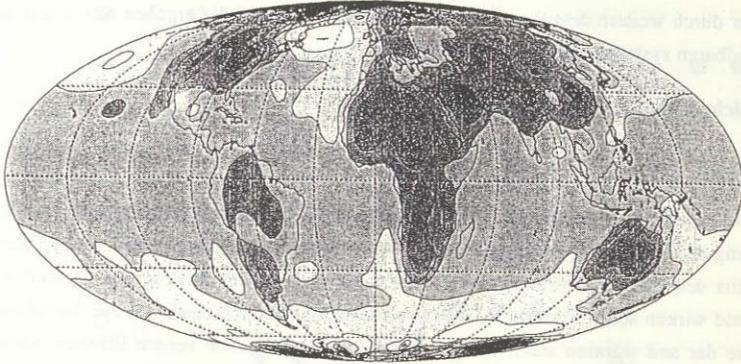
Abb. 7 zeigt die berechnete globale Verteilung der Temperaturerhöhung nach 100 Jahren für die Szenario-A-Simulation. Die Aufnahme von Wärme im Ozean führt zur deutlichen Verzögerung der Erwärmung in der südlichen Hemisphäre, die einen wesentlich höheren Ozeananteil als die nördliche Hemisphäre aufweist, sowie im Nord-Atlantik und im Nord-Pazifik. Die geringere Erwärmung im Nord-Atlantik und in Teilen des südlichen Pazifik ist zum Teil auch auf eine Änderung der ozeanischen Zirkulation zurückzuführen. Insbesondere wird der Wärmetransport durch den Golfstrom um etwa 20 % abgeschwächt.

Ferner ist in Abb. 7 eine stärkere Erwärmung in höheren Breiten als in den Tropen zu sehen. Dies ist hauptsächlich auf die positive Eis-Albedo-Rückkopplung zurückzuführen: Ein Abschmelzen der Schnee- und Eisflächen durch Erwärmung erhöht die Absorption der einfallenden Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche, da Schnee- und Eisflächen Sonnenstrahlung wesentlich besser reflektieren als die freigeschmolzenen Ozeane und Erdoberflächen, wodurch die Erdoberfläche dann noch stärker erwärmt wird.

Die in Abb. 7 ersichtlichen qualitativen Eigenschaften der globalen Erwärmung wurden auch in Simulationen anderer Forschungsgruppen mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen reproduziert. Im Detail weichen die Ergebnisse, bedingt durch die unterschiedlichen physikalischen Ansätze und beschränkte Auflösung der Modelle, jedoch voneinander ab. Insbesondere können kleinskalige regionale Eigenschaften, wie z. B. der Temperaturanstieg, der Niederschlag oder die Bodenfeuchte für einzelne Länder innerhalb Europas, noch nicht

RZ Hamburg GKSGRAL 7.4 B4/07/15 GKSM m224013 19-Nov-92

2076-2085 Szenario A - Ctrl / 2m Temp. Difference [K]



RZ Hamburg GKSGRAL 7.4 B4/07/15 GKSM m224013 19-Nov-92

2076-2085 Szenario D - Ctrl / 2m Temp. Difference [K]

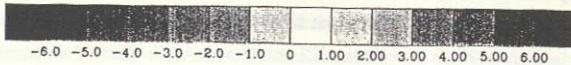
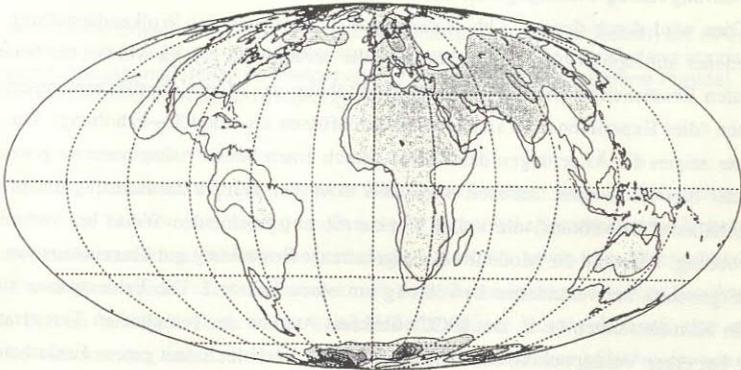


Abb. 7: Berechnete globale Erwärmung im Jahre 2085 für Szenario A (oben) und Szenario D (unten).

sicher berechnet werden. Zuverlässige regionale Aussagen werden voraussichtlich erst mit einer wesentlich erhöhten Auflösung der Modelle möglich sein. Einige Unsicherheitsfaktoren sind aber auch mit noch so leistungsfähigen Rechnern allein nicht zu beseitigen, sondern können nur durch weitere detaillierte Studien verringert werden oder ergeben sich sogar aus unvermeidbaren systeminhärenten Eigenschaften.

6. Unsicherheitsfaktoren bei Klimasimulationen

Modellunsicherheiten

Eine der größten potentiellen Fehlerquellen heutiger Klimamodellrechnungen liegt in der Behandlung der Wolken. Wolken sind ein wichtiger, aber äußerst komplexer Faktor in der Energiebilanz des Klimasystems. Einerseits liefern sie den größten Beitrag zur Reflektivität der Erde und wirken somit abkühlend, andererseits stellen sie auch eine wichtige Treibhauskomponente dar und wärmen somit die Erdoberfläche. Welcher von beiden Effekten überwiegt, hängt ab von den Eigenschaften der Wolken, von der Wolkenhöhe (bei hohen Wolken überwiegt im allgemeinen der Treibhauseffekt) und vom Sonnenstand (bei hohem Sonnenstand überwiegt der Albedo-Einfluß; in der polaren Nacht ist ausschließlich der Treibhauseffekt wirksam). Eine Änderung der Wolkenbedeckung der Erde um nur 10 % kann die Auswirkung einer CO₂-Verdoppelung, je nach Art der Änderung, aufheben oder verdoppeln. Zwar läßt sich die Berechnung der Wolken in Klimamodellen so abstimmen, daß die heutige Wolkenbedeckung befriedigend wiedergegeben wird, aber die Wiedergabe des Ist-Zustandes ist noch keine Garantie dafür, daß auch Veränderungen der Wolkenbedeckung infolge einer Klimaveränderung richtig wiedergegeben werden.

Dies wird durch den im Abb. 8 dargestellten Vergleich der Wolkendarstellung 19 verschiedener atmosphärischer Zirkulationsmodelle verdeutlicht [1]. Es wurden die berechneten globalen Erwärmungen infolge einer 4 ° C-Erhöhung der Meeresoberflächentemperatur verglichen (dies Experiment ließ sich leichter durchführen als eine CO₂-Erhöhung). Die offenen Punkte zeigen die Änderungen des Klimas (durch einen Sensitivitätsparameter gekennzeichnet, der hier nicht näher definiert wird, aber etwa der Temperaturänderung entspricht) bei festgehaltener Bewölkung, die vollen Punkte die entsprechenden Werte bei veränderlicher Bewölkung. Während die Modelle bei festgehaltener Bewölkung gut übereinstimmen, streuen die Ergebnisse bei veränderter Bewölkung um einen Faktor 3. Die Fehlerspanne entspricht der in Klimaberichten (z. B. des IPCC) üblichen Angabe der berechneten Temperaturänderung bei einer Verdoppelung des CO₂ als 3 ° C ± 1,5 ° C (d. h. mit einem Fehlerbereich um einen Faktor 3 von 1,5 - 4,5 ° C). Durch verbesserte Analyse von Satellitendaten hofft man, diese Unsicherheitsspanne in den nächsten Jahren reduzieren zu können.

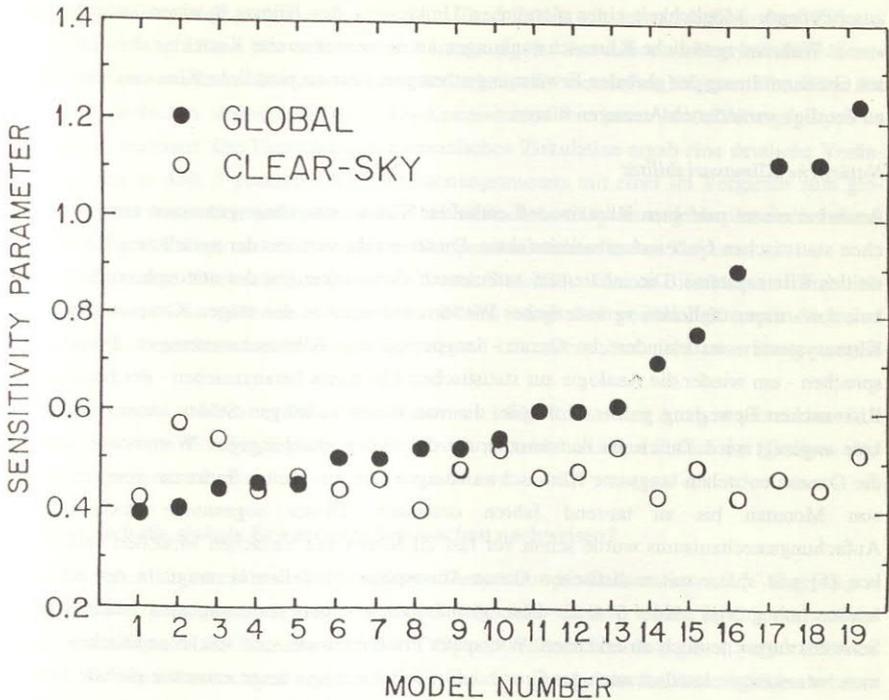


Abb. 8: Berechnete Erwärmung (durch einen Sensitivitätsparameter dargestellt) bei einer Erhöhung der Meeresoberflächentemperatur um 4°C für 19 verschiedene atmosphärische Zirkulationsmodelle bei festgehaltener Wolkenbedeckung (offene Punkte) und veränderlicher Wolkenbedeckung (schwarze Punkte).

Weitere kritische potentielle Fehlerquellen bei Klimaberechnungen sind die Behandlung der Bodenfeuchte, der Tiefenwasserbildung im Ozean (die die großskalige ozeanische Zirkulation und somit den ozeanischen Wärmetransport stark beeinflusst) sowie der Wechselwirkung Meereis-Ozean-Atmosphäre (die wesentlich zur in Abb. 7 ersichtlichen erhöhten Erwärmung in hohen Breiten beiträgt). Trotz dieser Unsicherheitsfaktoren besteht dennoch eine allgemeine Übereinstimmung unter Klimaforschern über die Größenordnung der zu erwartenden globalen Erwärmung. Diese beruht nämlich letztlich auf dem physikalisch gut fundierten, durch Rechnungen und Messungen erhärteten Treibhausmechanismus. Die Modellunsicherheiten betreffen letztlich Details der Antwort des Klimasystems auf den Antrieb durch die erhöhte Wärmerückstrahlung, nicht die Größenordnung des Antriebs an sich.

Neben systematischen Modellfehlern gibt es aber noch zwei weitere Unsicherheitsfaktoren bei Klimahochrechnungen: die natürliche Variabilität des Klimas und die nicht völlig aus-

zuschließende Möglichkeit eines plötzlichen Umkippens des Klimas in einen anderen Zustand. Während natürliche Klimaschwankungen keine nennenswerte Korrektur der geschätzten Größenordnung der globalen Erwärmung erbringen, können plötzliche Klimaumschwünge zu deutlich veränderten Aussagen führen.

Natürliche Klimavariabilität

Auch bei einem perfekten Klimamodell enthalten Klimahochrechnungen einen unvermeidlichen statistischen Unberechenbarkeitsfaktor. Dieser ergibt sich aus der natürlichen Variabilität des Klimasystems. Die inhärenten 'turbulenten' Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation - unser tägliches, veränderliches Wetter - erzeugen in den trägen Komponenten des Klimasystems - insbesondere im Ozean - langperiodische Klimaschwankungen. Diese entsprechen - um wieder die Analogie zur statistischen Mechanik heranzuziehen - der bekannten Brownschen Bewegung großer Moleküle, die von vielen zufälligen Stößen kleinerer Moleküle angeregt wird. Durch die Aufsummierung der vielen unabhängigen 'Wetterstöße' durch die Ozeane entstehen langsame Klimaschwankungen, die ein breites Spektrum von Perioden von Monaten bis zu tausend Jahren umfassen. Dieser sogenannte stochastische Anfachungsmechanismus wurde schon vor fast 20 Jahren mit einfachen Modellen beschrieben [5] und später mit realistischen Ozean-Atmosphäre-Modellen bestätigt. In der Klimahochrechnung von Abb. 6 sind diese grundsätzlich nicht vorhersagbaren statistischen Schwankungen deutlich zu erkennen. Wie später erläutert wird, sind solche natürlichen Klimaschwankungen letztlich auch der Grund dafür, daß die schon heute erwartete globale Temperaturerhöhung infolge des Treibhausgasanstiegs, die nach Modellrechnungen etwa $0.5^\circ - 1^\circ \text{C}$ beträgt, sich noch nicht eindeutig in den Beobachtungsdaten nachweisen läßt.

Klimaumschwünge

Schließlich besteht als dritte Unsicherheitsquelle der Klimahochrechnungen die bei nichtlinearen Systemen nicht auszuschließende Möglichkeit einer sogenannten Bifurkations-Instabilität. Diese kann zu einem plötzlichen Umkippen des Klimas von einem Quasi-Gleichgewichtszustand in einen anderen führen. Beobachtungen an Tiefsee-Bohrkernen deuten auf mehrere plötzliche Klimaumschwünge in den letzten 500.000 Jahren hin, die möglicherweise durch Umstellungen der ozeanischen Zirkulation verursacht wurden. Modellsimulationen [8] sowie auch theoretische Studien deuten nämlich auf die Existenz verschiedener Gleichgewichtszustände der ozeanischen Zirkulation hin, die durch relativ geringfügige äußere Einwirkungen ineinander übergeführt werden können. So konnte zum Beispiel der Golfstrom, der größere Wärmemengen nordwärts transportiert und für die rund 6°C höheren Temperaturen Westeuropas gegenüber Nord-Amerika verantwortlich ist, in Modellsimulationen durch Herinführen frischen Schmelzwassers (wie z. B. beim Ausgang der letzten Eiszeit geschehen) innerhalb weniger Jahrzehnte abgestellt werden. Eine ähnliche Wirkung hätte ein erhöhter Niederschlag in hohen Breiten infolge einer globalen Erwärmung. Bei den Rechnungen zu Szenario A wurde in der Tat, wie bereits erwähnt, eine Abschwächung des Golfstroms um

etwa 20 % festgestellt, wenn auch noch kein Zusammenbruch der nordatlantischen Zirkulation. Diese Möglichkeit läßt sich aber bei Fortsetzung der Simulation nicht grundsätzlich ausschließen und wurde vor kurzem bei einer ähnlichen, aber wesentlich längeren Simulation bis hin zur vierfachen atmosphärischen CO_2 -Konzentration von einer Modellierungsgruppe in Princeton realisiert. Die Umstellung der ozeanischen Zirkulation ergab eine deutliche Veränderung des in Abb. 7 gezeigten Klimaerwärmungsmusters mit einer im Vergleich zum globalen Mittel wesentlich geringeren (aber bei vierfachem CO_2 -Anstieg absolut noch hohen) Erwärmung in Europa und einer stärkeren Temperaturzunahme in den Tropen.

Auch andere Klimasubsysteme, wie z. B. die Eisschilde, können Bifurkations-Instabilitäten aufweisen. Das Auftreten solcher Instabilitäten hängt aber gewöhnlich empfindlich von schlecht zu bestimmenden Modellgrößen ab und läßt sich daher nicht zuverlässig vorausberechnen.

Ein besserer Aufschluß über diese Zusammenhänge ist aus der Analyse plötzlicher Klimaschwünge der Vergangenheit anhand von paläoklimatischen Daten von Tiefsee- und Eisbohrkernen zu erhoffen.

7. Läßt sich die globale Erwärmung heute schon nachweisen?

In den letzten hundert Jahren ist die mittlere Temperatur der Erde um etwa $0,7^\circ\text{C}$ gestiegen (Abb. 9) [4, 7]. Es ist naheliegend, dies auf die ebenfalls seit dem letzten Jahrhundert zunehmende atmosphärische Konzentration von CO_2 und anderen Treibhausgasen zurückzuführen (Abb. 4). Modellrechnungen ergeben in der Tat eine Temperaturzunahme infolge des Anstiegs der Treibhausgaskonzentrationen in etwa der gleichen Größenordnung wie beobachtet. Dennoch läßt sich hier kein eindeutiger kausaler Zusammenhang ableiten. Klimadaten über mehrere Hunderte oder Tausende von Jahren weisen nämlich natürliche Schwankungen in allen Zeitskalenbereichen auf, wobei Änderungen innerhalb von hundert Jahren von der Größenordnung $0,5^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C}$ durchaus vorkommen. Es wäre insbesondere denkbar, daß der Temperaturanstieg des letzten Jahrhunderts noch den Auslauf der nach Ende der kleinen Eiszeit vom 16. zum 18. Jahrhundert eintretenden Erwärmung darstellt. Um sicherzustellen, daß der beobachtete Erwärmungstrend keine natürliche Schwankung darstellt, müßte man ihn voraussichtlich noch 10 - 20 Jahre weiter verfolgen, bis das anthropogene globale Erwärmungssignal sich deutlich aus dem natürlichen Rauschen heraushebt (Abb. 10). Allerdings wäre die globale Erwärmung dann bereits so weit fortgeschritten, daß sie nur noch mit großem Aufwand einzuhalten wäre. Die Prognose einer starken globalen Erwärmung bei ungehindertem Anstieg der Treibhausgaskonzentration basiert heute weniger auf dem gesicherten Nachweis einer bereits eingetretenen Erwärmung als vielmehr auf der gesicherten Physik des Treibhauseffektes sowie auf der beobachteten Zunahme der Konzentration der wirksamen Treibhausgase.

Ein wichtiger Faktor für die Auswirkung der globalen Erwärmung auf die Umwelt und auf die Lebensbedingungen des Menschen ist nicht nur die Erwärmung an sich (die in der gleichen Größenordnung liegt wie der Unterschied zwischen dem heutigen Klima und der

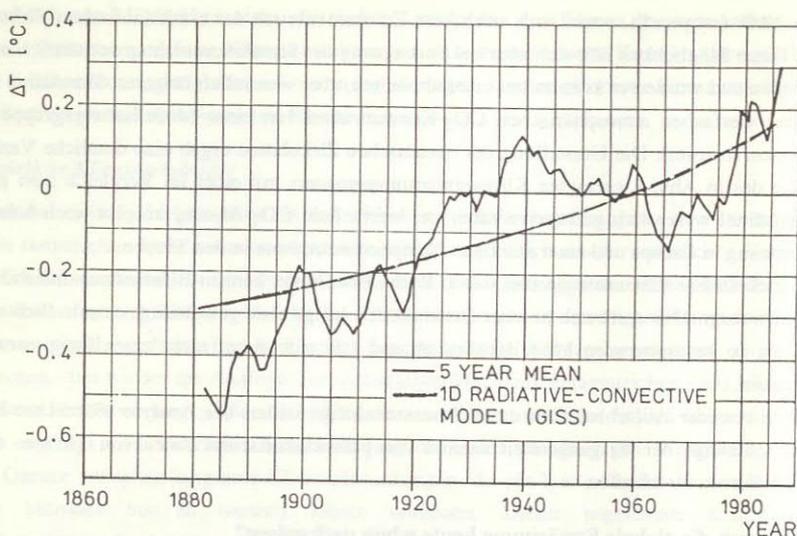


Abb. 9: Zunahme der beobachteten mittleren Oberflächentemperatur der Erde seit 1880. Ebenfalls eingetragen ist der mit einem einfachen Strahlungsbilanzmodell berechnete Temperaturanstieg infolge der Treibhausgaszunahme.

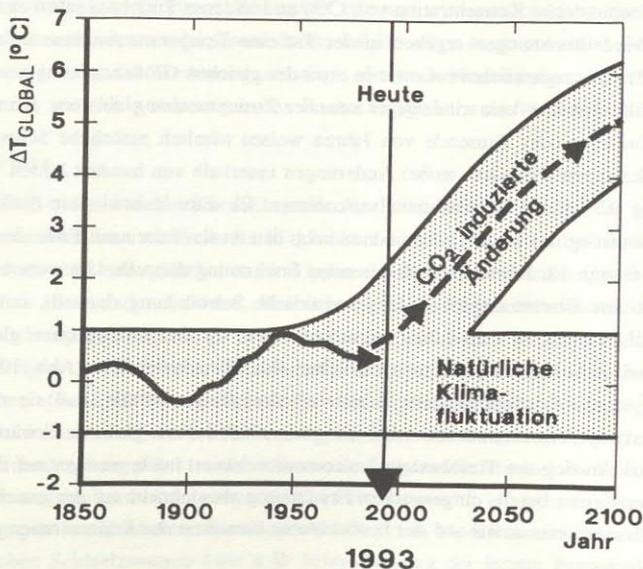


Abb. 10: Schematische Hochrechnung der beobachteten Temperaturzunahme von Abb. 9 mit Schwankungsbreite (σ = Standardabweichung) der natürlichen Variabilität. Einen statistisch zuverlässigen Nachweis einer anthropogenen Klimaänderung wird man voraussichtlich erst in 10-20 Jahren erbringen können.

letzten Eiszeit), sondern auch die Geschwindigkeit, mit der die Klimaänderung erfolgt. Diese ist etwa zehnmal schneller als bei einer typischen Eiszeit-Warmzeitfolge (Abb. 11). Es ist unbekannt, ob und wie natürliche Ökosysteme oder auch die menschliche Gesellschaft sich auf diese plötzliche starke Klimaänderung einstellen können.

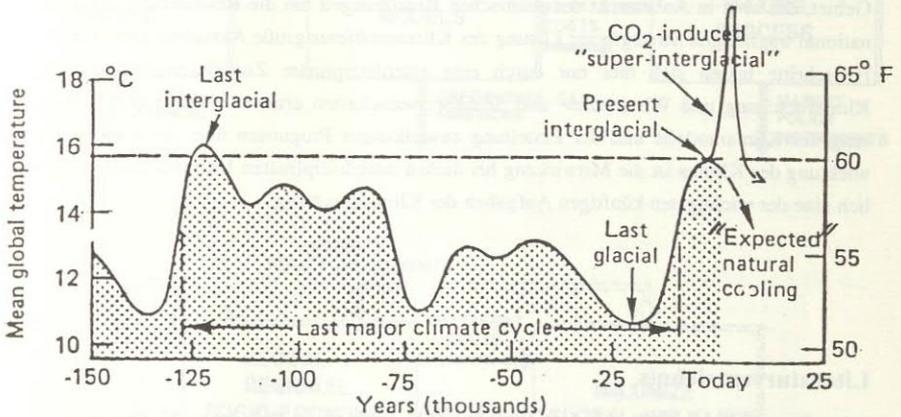


Abb. 11: Temperaturänderungen der letzten 150.000 Jahre und voraussichtliche künftige globale Erwärmung bei *business as usual*.

8. Auswirkungen auf die menschliche Gesellschaft

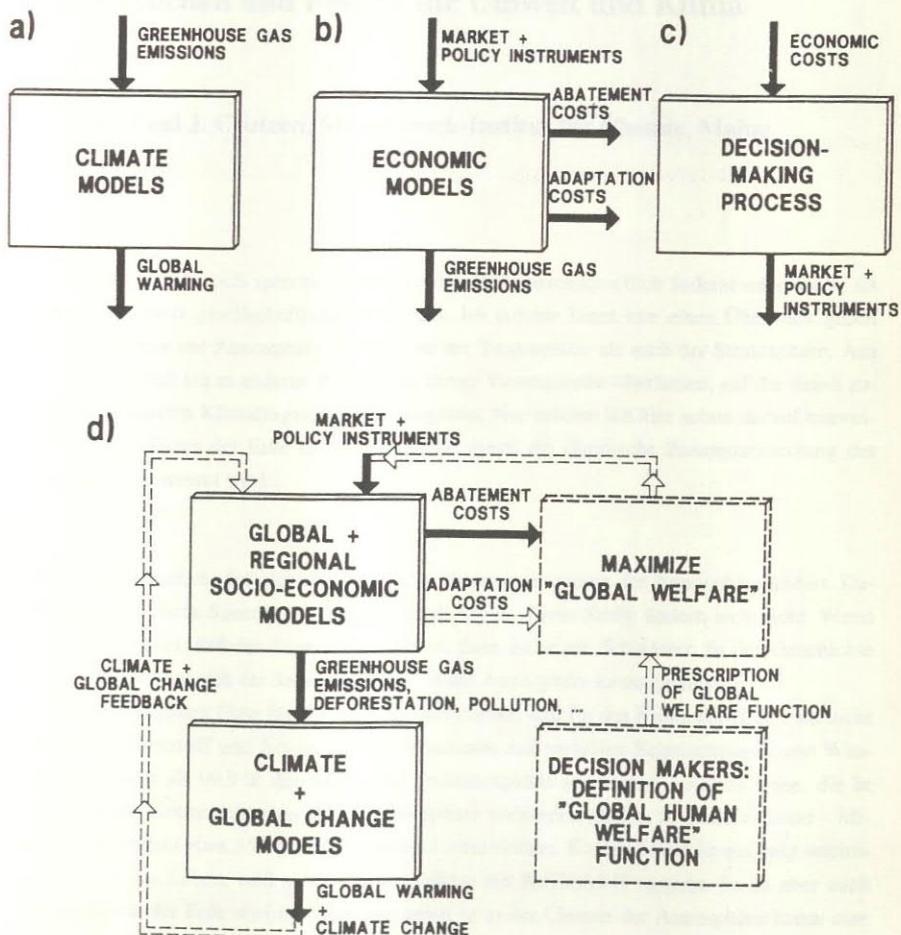
Über die Auswirkungen der vorhergesagten globalen Erwärmung für die Menschheit ist viel spekuliert worden. Die Meinungen reichen von einer unübersehbaren Katastrophe bis hin zur Aussage, daß eine Erwärmung um 3 °C für viele Menschen, die in höheren Breiten leben, angenehm sein könnte. Obwohl 3 °C im Vergleich zu täglichen Schwankungen oder auch Schwankungen von Monatsmittelwerten der Temperatur gering erscheinen mag, stellt eine dauernde Temperaturänderung von dieser Größenordnung, die sich noch dazu mit einer noch nie erlebten Geschwindigkeit einstellt, eine zwar schwer abzuschätzende, aber sicher nicht unbedeutende Belastung der Ökologie und der historisch gewachsenen gesellschaftlichen

Strukturen der Menschheit dar. Die ökonomischen und politischen Auswirkungen einer Verschlechterung der Nahrungsgewinnung und der allgemeinen Lebensbedingungen einzelner Regionen, insbesondere in den Entwicklungsländern, sind dabei besonders kritisch zu sehen. Zur quantitativen Untersuchung dieser Fragen sind wesentlich komplexere Modelle erforderlich, die neben dem Klimasystem auch die sozio-ökonomischen Systeme der Gesellschaft beinhalten ([6], Abb. 12). Die Wechselwirkung zwischen Klimaänderung und dem internationalen Netzwerk sozio-ökonomischer Systeme, einschließlich der verschiedenen Instabilitäten, die in solchen komplexen Systemen auftreten können, ist ein noch weitgehend unerforschtes Gebiet, das aber in Anbetracht der politischen Bemühungen um die Realisierung einer international tragfähigen Strategie zur Lösung des Klimaproblems große Aktualität gewonnen hat. Fortschritte lassen sich hier nur durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Klimaforschung und Wirtschafts- und Sozialwissenschaften erzielen. Neben der Verbesserung der Klimamodelle und der Erstellung zuverlässiger Prognosen über die künftige Entwicklung des Klimas ist die Mitwirkung bei diesen interdisziplinären Untersuchungen sicherlich eine der wichtigsten künftigen Aufgaben der Klimaforschung.

Literaturverzeichnis

- [1] Cess, R. D., G. L. Plotter, J. P. Blanchet, G. J. Boer, A. D. Del Genio, M. Déqué, V. Dymnikov, V. Galin, W. L. Gates, S. J. Ghan, J. T. Kiehl, A. A. Lacis, H. Le Treut, Z.-X. Li, X.-Z. Liang, B. J. McAvaney, V. P. Meleshko, J. F. B. Mitchell, J.-J. Morcrette, D. A. Randall, L. Rikus, E. Roeckner, J. F. Royer, U. Schlese, D. A. Sheinin, A. Slingo, A. P. Sokolov, K. E. Taylor, W. M. Washington, R. T. Wetherald, I. Yagai, and M.-H. Zhang: *Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in nineteen Atmospheric general circulation models*. In: J. Geophys. Res., 95, pp. 16,601-16,615, 1990.
- [2] Cubasch, U., K. Hasselmann, H. Höck, E. Maier-Reimer, U. Mikolajewicz, B. D. Santer und R. Sausen: *Time-dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model*. In: Climate Dynamics, 8, pp. 55-69, 1992.
- [3] Enquête-Kommission Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre, Dritter Bericht, 1990.
- [4] Graßl, H. und R. Klingholz: *Wir Klimamacher. Auswege aus dem globalen Treibhaus*. S. Fischer Verlag GmbH, Frankfurt am Main, 1990.
- [5] Hasselmann, K.: *Stochastic climate models*, Part 1: Theory. In: Tellus, 28, pp. 473-485, 1976.
- [6] Hasselmann, K.: *How well can we predict the climate crisis?* Conference on Environmental Scarcity: The International Dimension, 5-6 July 1990, Kiel, FRG (Ed.: Horst Siebert). Symposien- und Konferenzbände des Instituts für Weltwirtschaft an der Universität Kiel. J. C. B. Mohr (Paul Siebeck) Tübingen. pp. 165-183, 1991.
- [7] Houghton, J. T., G. J. Jenkins und J.J. Ephraums (editors), 1990. Climate Change, The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, 365 pp.
- [8] Maier-Reimer, E., and U. Mikolajewicz: *Experiments with an OGCM on the cause of the Younger Dryas*. In: Ayala-Castanares A., W. Wooster., A. Yanez-Arancibia (eds), Oceanography 1988. UNAM Press, Mexico, pp. 87-100, 1989.

GLOBAL ENVIRONMENT AND SOCIETY (GES) MODEL



092LHaf

Abb. 12: Struktur eines gekoppelten Klima-sozio-ökonomischen Modells zur Untersuchung der Wechselwirkung Klima - Mensch.