

1080  
Robert Gerwin (Hrsg.)

# Wie die Zukunft Wurzeln schlug

Aus der Forschung  
der Bundesrepublik Deutschland

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong

ROBERT GERWIN

Heubergstraße 28  
D-8017 Ebersberg bei München

---

*Umschlagbild:* Das Bild auf dem Umschlag stammt aus dem Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg und wurde von Josef Wiegand aufgenommen. Es zeigt das Justieren des Bestrahlungsfeldes an einem strahlentherapeutisch genutzten Elektronen-Linearbeschleuniger mit der Hilfe von Laser-Lichtvisieren.

*Frontispiz:* Auch dort, wo in der Forschung leistungsfähigste Computer längst unverzichtbar sind – beispielsweise hier bei DESY in Hamburg, einem der führenden Zentren der Elementarteilchenforschung – lassen sich Ideenreichtum, Phantasie und harte Denkarbeit durch nichts ersetzen. Davon überzeugt, daß sich hinter allen beobachteten und gemessenen Ungereimtheiten letztlich einfache Gesetzmäßigkeiten der Natur verbergen, diskutiert man mit dem Kollegen aus dem anderen Winkel der Erde bis spät in die Nacht. (Photo: DESY/Schmidt-Luchs)

---

Mit 183 Abbildungen davon 103 in Farbe

ISBN 3-540-51346-9 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York  
ISBN 0-387-51346-9 Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

*Wie die Zukunft Wurzeln schlug* : aus der Forschung der Bundesrepublik Deutschland / R. Gerwin. – Berlin ; Heidelberg ; New York ; London ; Paris ; Tokyo ; Hong Kong ; Springer, 1989

ISBN 3-540-51346-9 (Berlin ...)

ISBN 0-387-51346-9 (New York ...)

NE: Gerwin, Robert [Hrsg.]

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1989  
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Diese Publikation wurde vom BMFT angeregt und finanziell unterstützt.

Datenkonvertierung und Druck: Druckhaus Beltz, D-6944 Hemsbach/Bergstr.  
Einband: J. Schäffer GmbH & Co. KG, D-6718 Grünstadt  
2155/3150-543210 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

# Das Klimaproblem – eine Herausforderung der Forschung

Ursachenforschung und Vorhersagbarkeit von Klimaänderungen durch gekoppelte Modellsysteme · Erfassung des »Systems Erde«

Das durch die massiven Eingriffe des Menschen ausgelöste Klimaproblem ist sicher weit mehr als nur eine Herausforderung der Forschung. Doch die Forschung hat diese Herausforderung angenommen und konnte in erstaunlich kurzer Zeit – innerhalb eines Jahrzehnts – eine neue wissenschaftliche Disziplin schaffen, die eine ganz erstaunliche Entwicklung nimmt. Durch das Klimaforschungsprogramm der Bundesregierung ist es gelungen, Forschungsgruppen der verschiedensten Disziplinen sehr effektiv zusammenzuführen und die Modelle zu entwickeln, die man zur Klärung der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Stoff- und Energiekreisläufen innerhalb des atmosphärischen Klimas braucht. Klaus Hasselmann hat diese Entstehungsgeschichte aus verschiedenen Perspektiven unmittelbar miterlebt.

Die Klimaforschung im modernen Sinne – im Sinne der Systemanalyse – ist eine noch recht junge Wissenschaft. Der Wandel von der traditionellen Klimatologie – einer beschreibenden Wissenschaft, die sich vornehmlich mit der geographischen und historischen Erfassung der unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse der Erde befaßte – zur heutigen Erforschung des Klimasystems als ein komplexes dynamisches System mit vielfältigen physikalischen, chemischen und biologischen Wechselwirkungen vollzog sich erst in den 70er Jahren.

Zu dieser Zeit wurde es den Wissenschaftlern immer deutlicher, allerdings ohne daß ihnen damals die Öffentlichkeit nennenswert Gehör schenkte, daß die Menschheit bei Beibehaltung ihrer bisherigen ungestümen und ungesteuerten technischen Entwicklung auf eine ernste Klimakrise zusteuerte. Bei fortwährendem Anstieg der Emissionen von Treibhausgasen, insbesondere von CO<sub>2</sub>, war abzuschätzen, daß wir innerhalb von 50–100 Jahren eine globale Erwärmung erfahren würden, die noch nie in diesem Ausmaß

in der langen Menschheitsgeschichte vorgekommen ist.

Die möglichen Folgen dieser Klimaänderungen wie Verlagerung der Klimazonen, Erhöhung des Meeresspiegels, Verschiebungen (und entsprechende Einbußen) bei der Landwirtschaft, dadurch ausgelöst Störungen des Welthandels, verbunden mit internationalen Spannungen bis hin zu Völkerwanderungen oder sogar kriegerischen Auseinandersetzungen, sind inzwischen hinlänglich bekannt und wurden von den Medien in letzter Zeit mehrfach dargelegt.

## **Klimaforschung auf der Basis quantitativer Methoden moderner Systemanalyse**

Um sich dieser Krise stellen zu können, mußte man die Auswirkungen der vielfältigen menschlichen Eingriffe in das Klimasystem wesentlich genauer erfassen, als es zur damaligen Zeit möglich war. Hierzu brauchte man zunächst bessere Kenntnisse der komplexen inneren Wechselwir-

kungen des Klimasystems. Dann mußten diese in realistische Rechenmodelle umgesetzt werden.

Das Bemühen, die Klimaforschung als neue wissenschaftliche Disziplin auf der quantitativen Basis der modernen Systemanalyse zu gründen, fand im August 1974 bei der Konferenz »The Physical Basis of Climate and Climate Modelling« in Stockholm seinen Niederschlag. Die Stockholmer Empfehlungen bildeten dann im Jahre 1979 die Grundlage für das von der WMO, der Welt-Meteorologischen Organisation, und der UNO ausgerufene Weltklimaprogramm.

Noch im gleichen Jahr beschloß das Bundeskabinett die Erstellung eines nationalen Klimaforschungsprogramms, das dann 1981 – ebenfalls auf der Basis einer vorbereitenden wissenschaftlichen Konferenz im Februar 1980 in Bad Soden-Allendorf – verabschiedet wurde. Auf ähnliche Weise wurde kurz danach auch das europäische Klimaforschungsprogramm ins Leben gerufen.

Die Entwicklung der Klimaforschung in diesen Jahren war rasant. Ich hatte das Glück, diese Entstehungsgeschichte aus verschiedenen Perspektiven unmittelbar mitzuerleben: als Mitglied des Joint Organizing Committee (JOC) des Global Atmospheric Research Programme (GARP), das die Stockholmer Konferenz einberief; als Teilnehmer in verschiedenen Ausschüssen, die das nationale und das europäische Klimaforschungsprogramm vorbereiteten; auf der eigenen Forschungsebene als Leiter des Max-Planck-Institutes für Meteorologie, das im Jahre 1975 speziell zur Erforschung der physikalischen Grundlagen des Klimas gegründet wurde, und später schließlich als wissenschaftlicher Direktor am Deutschen Klimarechenzentrum, das 1988 als zentrale Einrichtung der Klimaforschung errichtet wurde und das – ausgestattet mit einem der leistungsfähigsten Superrechner, einer CRAY 2 – die erste Aufbauphase der Klimaforschung in der Bundesrepublik eindrucksvoll abschloß. Ich will versu-

chen, einige Facetten dieser faszinierenden Phase des wissenschaftlichen Aufbaus nachzuzeichnen in der Hoffnung, daß sich aus dieser Rückblende auch nützliche Erfahrungen für die Gestaltung der künftigen Forschungsentwicklung ableiten lassen.

Wir befinden uns nämlich heute wieder in einer ähnlichen Situation wie zu Beginn der 70er Jahre. Damals galt es, ausgehend vom erfolgreichen Aufbau der modernen Meteorologie, die die Grundlage der heutigen numerisch-dynamischen Wettervorhersage geschaffen hatte, ein neues, noch völlig undefiniertes Forschungsgebiet zu erschließen. Dies war nur möglich durch die Ausweitung des bisherigen Forschungsbereichs auf weitere Disziplinen, die bisher wenig mit der Meteorologie gemein hatten, insbesondere auf die Ozeanographie, Biologie, Hydrologie, Chemie und Kryosphären-Forschung (Eis- und Schneeforschung).

In den letzten Jahren wird nun immer deutlicher, daß auch die moderne Klimaforschung noch zu eng gefaßt ist. Das Klimaproblem kann heute nicht mehr sinnvoll getrennt werden vom Umweltproblem schlechthin. Im »Internationalen Geosphären-Biosphären-Programm« (IGBP), oder kurz »Global-Change«-Programm, sucht die Wissenschaft neuerdings nach einem umfassenden Rahmen zur Erforschung des »Systems Erde«. Die Erfahrungen beim erfolgreichen Aufbau der Weltklimaforschung, die im »Global-Change«-Programm eine zentrale Stellung einnehmen wird, könnten hierbei wertvolle Hilfe leisten.

Die Situation in den 70er Jahren möchte ich an zwei Beispielen veranschaulichen: die Einberufung der Stockholmer Konferenz durch das Joint Organizing Committee (JOC) von GARP und die Suche nach einem sinnvollen Klimaforschungsprogramm für das neue Max-Planck-Institut in den ersten Jahren nach seiner Gründung. Sie beleuchten aus unterschiedlicher Perspektive die

Ausgangslage, aus der sich der rapide Aufbau der Klimaforschung in der Bundesrepublik in der Folge entwickelte.

### **Die Stockholmer Konferenz – Konzeption eines langfristig angelegten Forschungsprogramms**

Die Diskussionen im JOC über den Aufbau der Klimaforschung waren kontrovers und leidenschaftlich. Alle waren sich zwar einig, daß eine moderne Klimaforschung geschaffen werden mußte und daß dies nur durch die Wissenschaftler selbst erfolgen konnte. Aber die Meinungen darüber, ob JOC hierfür das richtige wissenschaftliche Gremium war, gingen recht weit auseinander.

Die ursprüngliche Aufgabe des JOC war die Koordinierung des Globalen Atmosphärischen Forschungsprogramms GARP, das man Mitte der 60er Jahre ins Leben gerufen hatte, um zwei entscheidenden Fortschritten der Meteorologie zum Durchbruch zu verhelfen:

- der Einführung der numerischen Wettervorhersage mit Hilfe von aufwendigen Modellrechnungen auf neuen, leistungsfähigen Großrechnern und
- der Gewinnung der für die Modelle benötigten Daten mit neuen, in den erdnahen Weltraum gebrachten meteorologischen Satelliten.

Das GARP-Projekt war außerordentlich erfolgreich. Es wurden umfangreiche, internationale Meßprogramme durchgeführt, zunächst in den Tropen durch das Global Atmospheric Tropical Experiment (GATE) und dann weltweit im sogenannten »Global Experiment«. In diesen Projekten sollten die wichtigsten dynamischen Prozesse in der Atmosphäre studiert und die meteorologischen Vorhersagemodelle verifiziert werden. Gleichzeitig wurden auch die numeri-

schen Modelle selbst rapide weiterentwickelt und untereinander verglichen. Die eindrucksvolle Erweiterung der Vorhersagegrenze für großräumige Wettervorhersagen von drei auf sechs Tage, die z.B. das Europäische Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage in Reading (England) im letzten Jahrzehnt erzielen konnte, basierte nicht zuletzt auf den Ergebnissen von GARP.

Was lag da näher, als dieses erfolgreiche Rezept auf die Klimaforschung zu übertragen. Darin waren sich aber dann allerdings alle im JOC einig: So einfach ging das nicht. GARP war erfolgreich, weil es ein wohldefiniertes »homogenes« Problem aufgriff: Es betraf nur Wissenschaftler einer einzigen Disziplin, die die gleiche Zielvorstellung verband. Außerdem lagen bereits neue bahnbrechende Techniken vor, und man war sich grundsätzlich einig, welche Probleme mit welchen Methoden damit in Angriff genommen werden sollten. Das Kennzeichnende am Klimaproblem war hingegen gerade seine Heterogenität. Es war zunächst noch völlig unklar, wie das Problem wissenschaftlich in Angriff genommen werden sollte oder wie man die vielen verschiedenen Disziplinen, die hier zusammenwirken mußten, überhaupt zusammenbringen konnte.

Dem Nichtmeteorologen, bei dem die Begriffe »Wetter« und »Klima« häufig etwas ineinander verschwimmen, mag dies schwer verständlich sein. Man muß sich aber klarmachen, daß zur Vorhersage des Wetters die Veränderung der Atmosphäre lediglich für einige Tage, maximal für eine oder zwei Wochen, berechnet wird. Dabei geht man von einem bekannten (mit Hilfe des globalen meteorologischen Beobachtungssystems gemessenen) Ausgangszustand aus. Wie dieser Ausgangszustand zustande kommt, wird nicht gefragt.

Zur Berechnung der Wetterentwicklung werden dann zusätzlich noch eine Reihe weiterer

nichtatmosphärischer Daten benötigt: die Temperaturverteilung der Meeresoberfläche, die Schnee- und Eisbedeckung, die Beschaffenheit der Landoberfläche, insbesondere der Vegetation (die die Reflexionseigenschaften für die einfallende Sonnenstrahlung, die Energieabgabe durch Verdunstung, die Reibungswerte für Windströmung usw. beeinflussen), sowie schließlich auch die Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre, die die von der Erdoberfläche emittierende Wärmestrahlung teilweise absorbieren und wieder zurückstrahlen. Diese Größen ändern sich aber nicht merklich während des Vorhersagezeitraums und können daher für die Zwecke der Wettervorhersage einfach als bekannte konstante Größen vorgegeben werden.

Beim Klima ist die Situation dagegen grundsätzlich eine andere. Hier möchte man die Eigenschaften der Atmosphäre über ein breites Spektrum von Zeiträumen ermitteln – von einigen Monaten bis hin zu Jahrmillionen –, die allesamt wesentlich größer sind als typische Wettervorhersagefristen. Für diese Zeitskalen können die eben angeführten, nichtatmosphärischen Größen nicht mehr als konstant angesehen werden. Sie stellen vielmehr gerade die entscheidenden Steuergrößen dar, die in den Modellen explizit mitberechnet werden müssen, wenn die Entwicklung des Klimas richtig vorhergesagt werden soll.

Modelle zur Berechnung dieser Steuergrößen gab es aber bis dahin nicht. Die einzelnen wissenschaftlichen Disziplinen, die die hierfür erforderlichen Klimamodelle im Prinzip hätten erstellen können, hatten sich bisher nicht als integraler Teil der Klimaforschung verstanden und hatten deshalb natürlich auch kaum Modelle erstellt, die für die Fragen der Klimaforschung geeignet waren.

Wie sollte man diese Disziplinen nun zu einer neuen, einheitlichen Forschungsdisziplin zu-

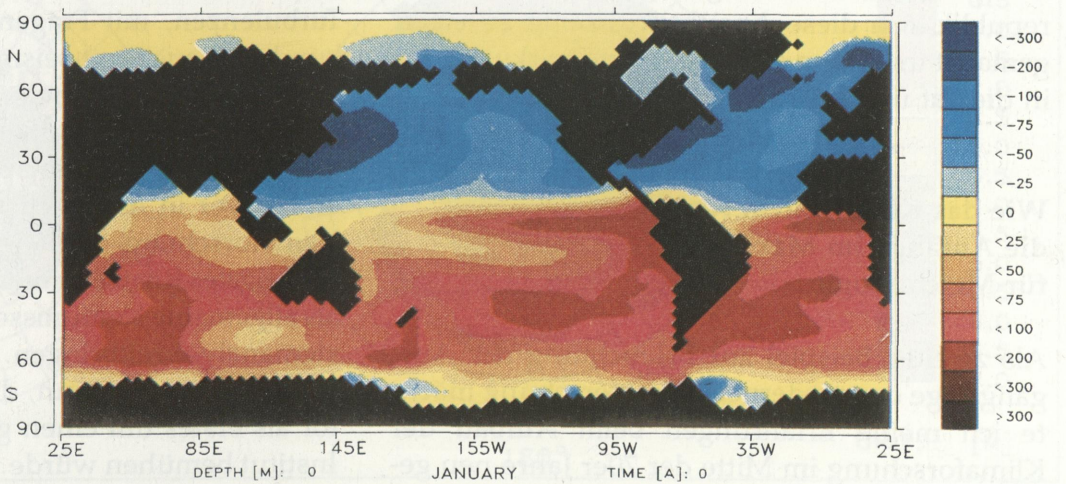
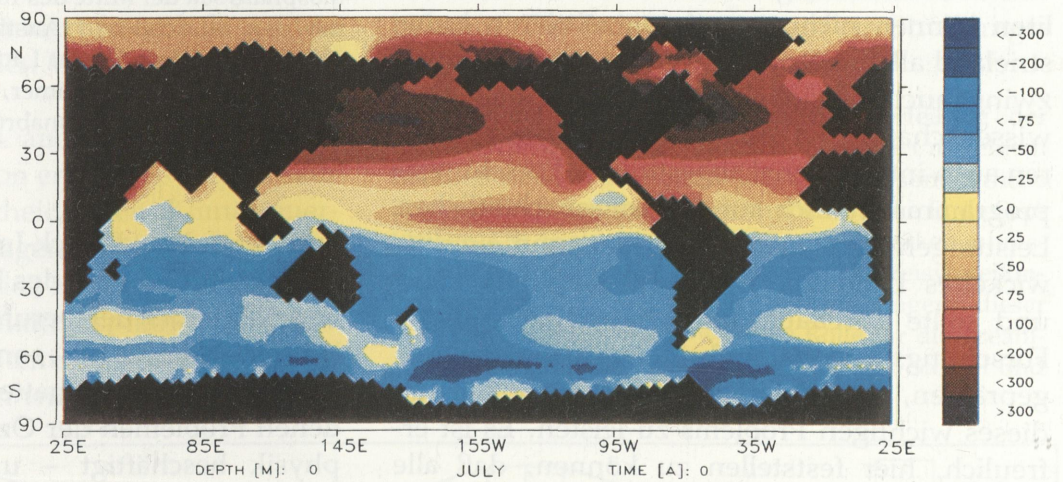
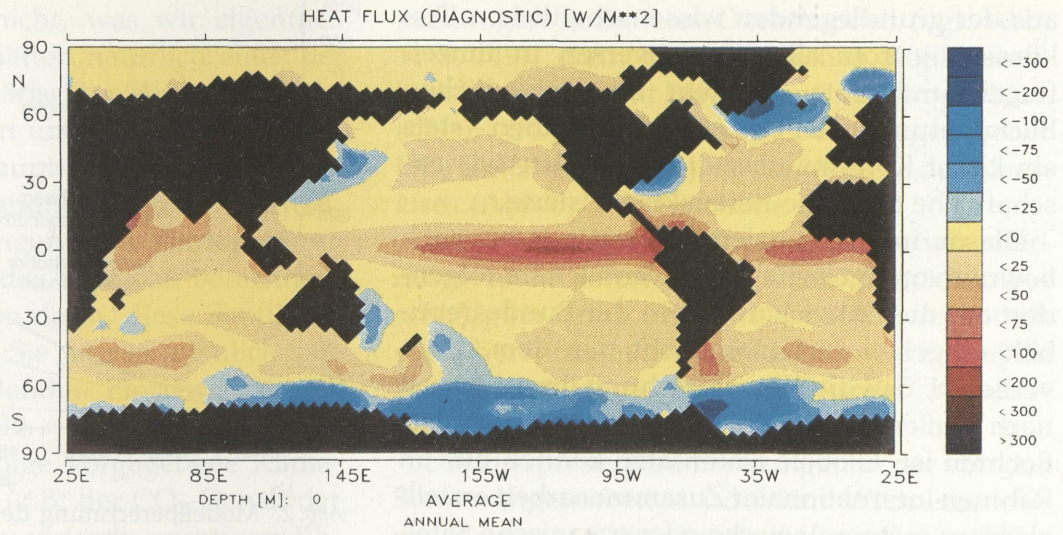
sammenführen? Wenn JOC versuchen würde, die Initiative zu ergreifen, würde man dann nicht gerade die Erfolge von GARP gefährden, die doch auf der bewährten Beschränkung auf eine wohldefinierte Fragestellung innerhalb einer wohldefinierten Disziplin beruhen?

Nach heftigen Diskussionen setzte sich schließlich die wagemutige Fraktion gegen die vorsichtige durch, und es wurde beschlossen, Vertreter aller klimarelevanten Disziplinen zu einem Symposium in Stockholm einzuladen, um die Grundlagen eines internationalen Klimaforschungsprogramms auszuarbeiten. Die Konferenz führte dann – zur Überraschung der meisten Beteiligten – zur Konzeption eines wissenschaftlich fundierten, langfristig angelegten Rahmenprogramms, das die Basis bildete für das später ausgerufenen WMO/UNO-Weltklimaprogramm.

Die Erfahrungen der Stockholmer Konferenz wiederholten sich in weiteren wissenschaftlichen Symposien, die zur Gründung des nationalen und des europäischen Klimaforschungsprogramms führten. Es stellte sich heraus, daß sich

---

Abb. 1. Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre weltweit, *oben* im Jahresmittel, *mitte* im Sommer und *unten* im Winter, gerechnet mit einem ozeanischen Zirkulationsmodell. Im Jahresmittel nimmt der Ozean in den Tropen Wärme auf (*rot*) und gibt Wärme in höheren Breiten an die Atmosphäre zurück (*blau*). Der hiermit verbundene Wärmetransport erfolgt durch Meeresströmungen; die Wärmeabgabe des Golfstromes im Nordatlantik und des Kuroshios im Nordpazifik sind deutlich zu erkennen. Die ausgeprägten Unterschiede zwischen den sommerlichen und winterlichen Feldern des Wärmeaustausches (Weltkarte *mitte* und *unten*) sind dagegen zurückzuführen auf eine Speicherung von Wärme im Ozean während des Sommers, die im Winter wieder an die Atmosphäre abgegeben wird – ohne einen horizontalen Wärmetransport. Beide Prozesse – sowohl der Wärmetransport im Jahresmittel als auch die jahreszeitlichen Wärmeaufnahmen und Wärmeabgaben – haben einen starken Einfluß auf unser Klima (E. Maier-Reimer, MPI für Meteorologie)



aus der grundlegenden wissenschaftlichen Diskussion – trotz aller Kontroversen in Einzelfragen und trotz der sehr unterschiedlichen Blickrichtungen der einzelnen Disziplinen – stets ein klarer Konsens über die sinnvollste wissenschaftliche Strategie herauskristallisierte.

Diesen internationalen Hintergrund habe ich bewußt vorangestellt, denn wenn ich im folgenden auf die Entwicklungen in der Bundesrepublik eingehe, darf man nicht aus dem Auge verlieren, daß die Klimaforschung ihrem Wesen nach außerordentlich stark international verflochten ist. Globale Datensätze können nur im Rahmen internationaler Zusammenarbeit erstellt werden; meteorologische oder ozeanische Satelliten können nicht von einem mittleren Industrieland allein betrieben werden, und natürlich zwingt auch die globale Fragestellung stark zum wissenschaftlichen Austausch. Dennoch basieren auch international abgestimmte Forschungsprogramme letztlich auf den wissenschaftlichen Leistungen der einzelnen Länder, und ein entwickeltes Land wie die Bundesrepublik kann und sollte durchaus das notwendige kritische Forschungspotential aufbringen, um einen ausgeprägten, eigenständigen Beitrag zur Lösung dieses wichtigen Problems zu leisten. Es ist erfreulich, hier feststellen zu können, daß alle maßgeblichen Forschungsträger in der Bundesrepublik sich diese Ansicht frühzeitig zu eigen gemacht und dann auch rasch und wirkungsvoll in die Tat umgesetzt haben.

### Wie das Klimasystem funktioniert – die Anfänge im Max-Planck-Institut für Meteorologie

Als zweites Beispiel zur Beleuchtung der Ausgangslage der modernen Klimaforschung möchte ich meine Erfahrungen beim Aufbau der Klimaforschung im Mitte der 70er Jahre neu ge-

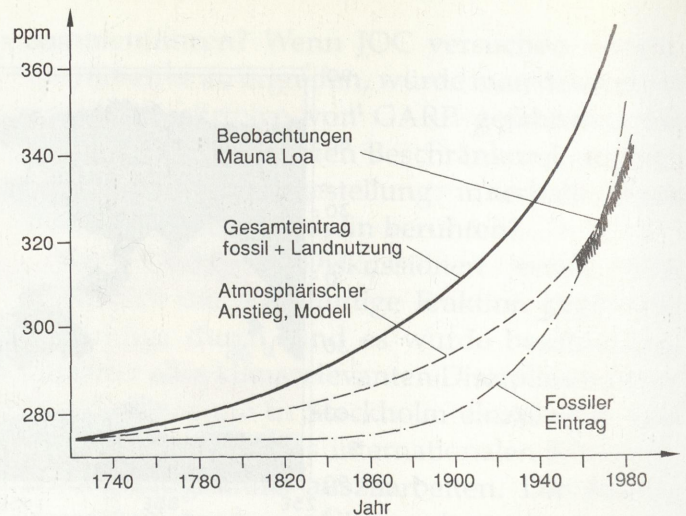


Abb. 2. Modellberechnung des CO<sub>2</sub>-Anstiegs in der Atmosphäre seit der Mitte des 18. Jahrhunderts, verglichen mit den tatsächlichen Anstiegswerten, die seit über 20 Jahren auf dem Mauna Lao der Hawaii-Inseln gemessen werden (E. Maier-Reimer, MPI für Meteorologie, und G. Esser, Universität Osnabrück)

gründeten Max-Planck-Institut für Meteorologie schildern. Als Leiter des Instituts hatte man keinen Klimaforscher berufen – den gab es ja im heutigen Sinn nicht –, sondern einen ausgebildeten Physiker. Dieser hatte sich zwar mit verschiedenen Problemen der Ozeanographie und Geophysik beschäftigt – u.a. mit Meereswellen (seinem besonderen Hobby), Strömungen und Turbulenzen, mit Fragen der Satelliten-Fernerkundung, auch mit seismischen Wellen und mit speziellen Problemen der Ausbreitung von geladenen Teilchen im Sonnenwind –, aber kaum mit ausgesprochenen Klimaproblemen. Man dachte wohl, wer in das noch ungeformte Gebiet der Klimaforschung einsteigen wollte, mußte als wichtigstes Rüstzeug nicht so sehr Spezialwissen als allgemeine Kenntnisse der physikalischen Systemanalyse mitbringen.

Alle erwarteten nun, daß sich der neue Direktor als erstes um einen großen Rechner für das Institut bemühen würde. Doch er tat dies nicht –



denn ich wußte gar nicht, was wir eigentlich rechnen sollten. Wir hätten natürlich eines der aufwendigen atmosphärischen Wettervorhersagemodelle übernehmen und betreiben können, die einige Gruppen – hauptsächlich in den USA – bereits für Klimasimulationen eingesetzt hatten, z.B. um die Auswirkungen einer Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes auf das Klima zu berechnen. Ich sah aber wenig Sinn darin, diese Simulationen zu wiederholen. Sie waren nämlich alle unter stark einschneidenden Einschränkungen durchgeführt worden. Es wurden bei den Rechnungen immer nur einige vorgegebene Klimasteuergrößen geändert (z.B. der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre), aber alle anderen wichtigen Klimasteuergrößen unverändert festgehalten – wie eben bei einem normalen Wettervorhersagemodell.

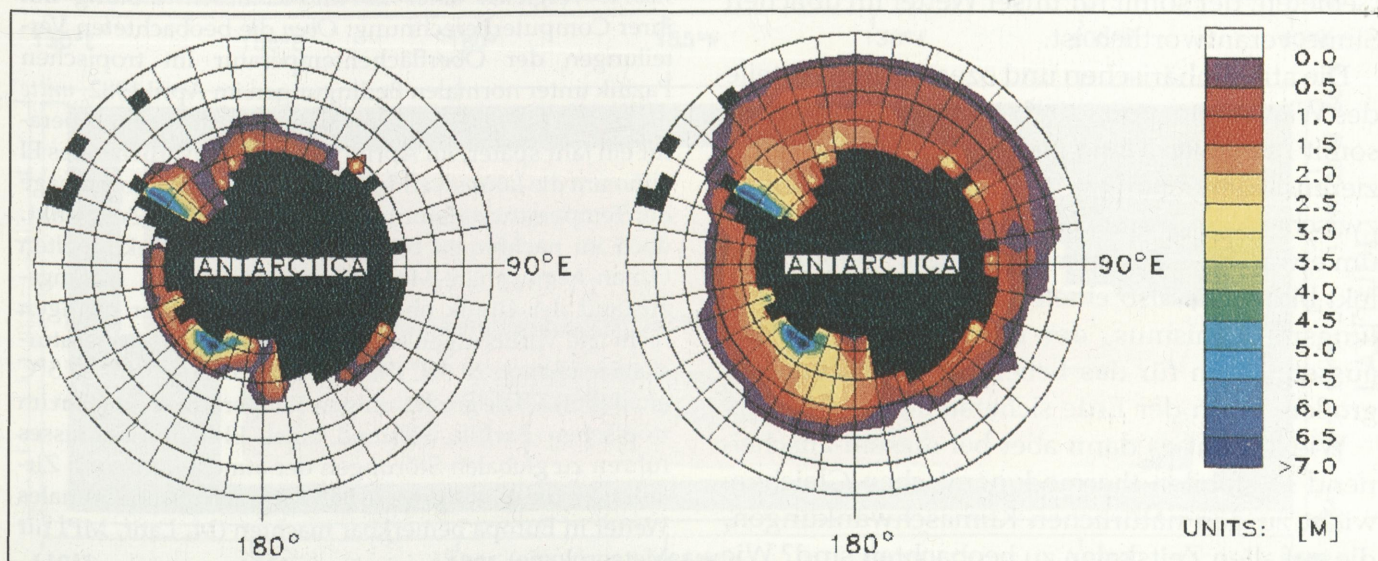
Man konnte damals auch gar nicht anders vorgehen, da – wie schon erwähnt – Modelle zur Berechnung der entscheidenden Klimasteuergrößen gar nicht vorlagen. Wir steckten uns daher am Institut das Ziel, zunächst Modelle für die noch fehlenden nichtatmosphärischen Komponenten des Klimasystems zu entwickeln. Am dringendsten brauchten wir ein für Klimaunter-

suchungen geeignetes Ozeanmodell (vgl. Abb. 1, S. 149), dann ein realistisches Kohlenstoffkreislaufmodell zur Berechnung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration bei vorgegebener CO<sub>2</sub>-Emission (Abb. 2), ferner Modelle des Meereises (Abb. 3), der Eisschilde usw.

Diese Modellentwicklungen haben wir allerdings nicht sofort aufgegriffen. Zunächst beschäftigten uns nämlich noch wesentlich einfachere, fundamentale Fragen, wie z.B. »Wie funktioniert denn überhaupt unser Klimasystem?«

Die Hauptenergieumsetzungen in der von der Sonne angetriebenen irdischen Wärmemaschine, die unser Klima bestimmt, waren natürlich bekannt: Die Erde stellt sich auf ein Strahlungs-

Abb. 3. Sommerliche und winterliche Verteilung der Meereisschichten in der Antarktis, berechnet mit einem hochauflösenden Meereismodell, *links* der sommerliche Zustand Ende Februar und *rechts* die Eisdicke Ende September. Die Skala reicht von 0–7 m. Die starken jahreszeitlichen Änderungen der südlichen Meereisverteilungen sowie die natürlichen Schwankungen dieser Verteilungen spielen eine wichtige Rolle für die ozeanische Zirkulation und das globale Klima (A. Stössel und P. Lemke, MPI für Meteorologie)



gleichgewicht ein, bei dem sie die Energie, die sie von der Sonne empfängt (etwa 70% der einfallenden Strahlung, während 30% reflektiert wird – vorwiegend von Wolken), wieder als Wärmestrahlung in das Weltall abgibt. Dabei wird durch den Treibhauseffekt, d.h. durch die Absorption und Rückstrahlung der Wärmestrahlung durch Spurengase in der Atmosphäre (hauptsächlich Wasserdampf, CO<sub>2</sub>, Ozon, Methan, FCKW-Sprühdosengase und Lachgas), die Gleichgewichtstemperatur der Erdoberfläche um etwa 35°C erhöht, im Vergleich zu dem Wert, der sich bei einer für die Wärmestrahlung völlig durchsichtigen Atmosphäre einstellen würde.

Nun ist die Strahlungsbilanz nur für die Erde als Ganzes ausgeglichen, nicht aber an jedem Ort. In den Tropen wird mehr Wärme von der Sonne empfangen, als die Erde durch Wärmestrahlung wieder abgibt, während es sich in den polaren Gebieten gerade umgekehrt verhält. Der Ausgleich zwischen den Gebieten mit Energieüberschuß und Energiedefizit erfolgt durch die atmosphärischen und ozeanischen Wind- und Strömungssysteme. Angetrieben wird dieser Wärmetransport durch den Temperaturunterschied zwischen den Tropen und den polaren Gebieten, der somit für unser Wetter im üblichen Sinne verantwortlich ist.

Die atmosphärischen und ozeanischen Anteile des Wärmetransports sind etwa gleich groß (und somit für unser Klima gleich wichtig). Sie reduzieren in ihrer Summe die Temperaturdifferenz zwischen den Tropen und den polaren Gebieten um etwa 50°C. Zusammen mit dem Treibhauseffekt bilden sie also einen entscheidenden Regulationsmechanismus, der die klimatischen Voraussetzungen für das Leben des Menschen auf großen Teilen der Erde sicherstellt.

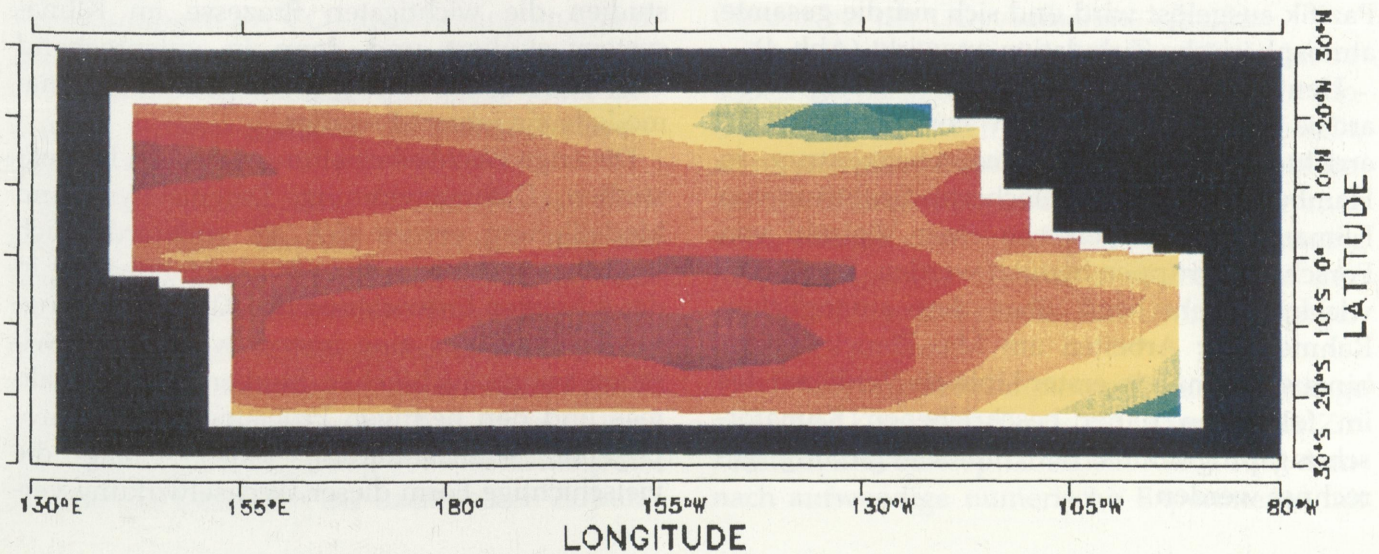
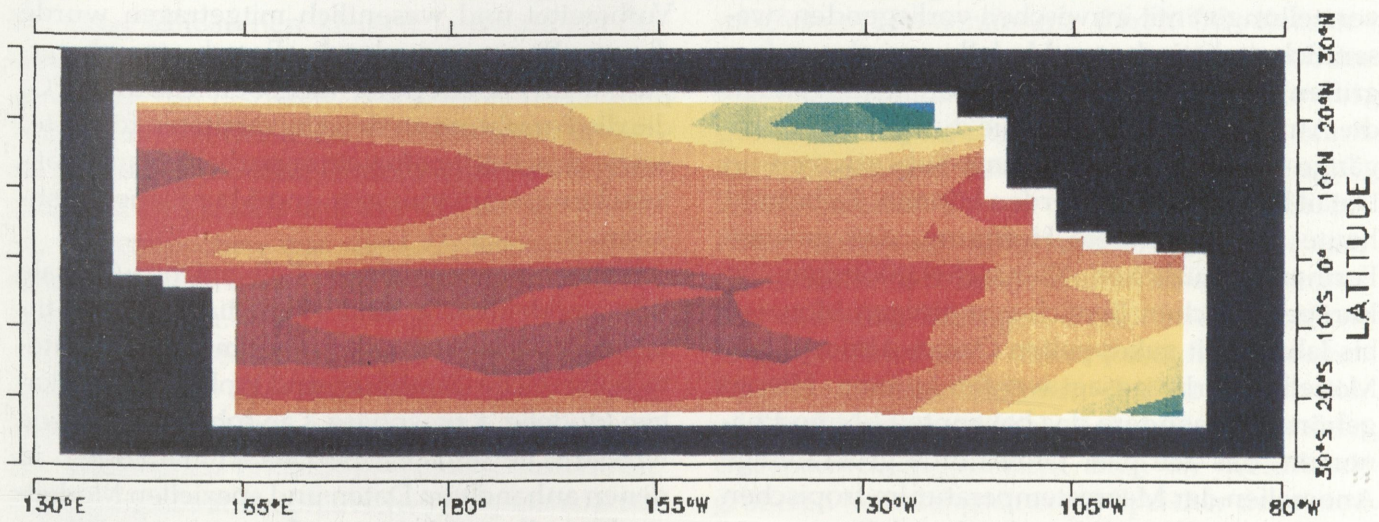
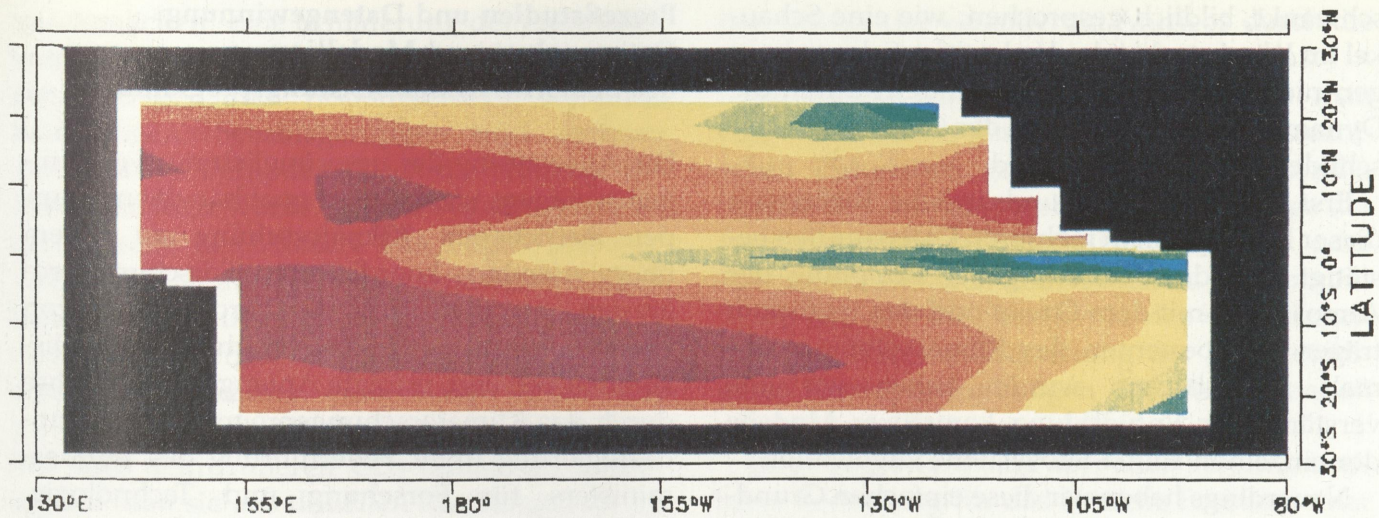
Wie kommt es dann aber bei diesem anscheinend so stabilen thermodynamischen Gleichgewicht zu den natürlichen Klimaschwankungen, die auf allen Zeitskalen zu beobachten sind? Wie

sind die Eiszeiten entstanden? Wie kam es zu der kleinen Eiszeit im 16.–18. Jahrhundert und zum Klimaoptimum etwa 1000 Jahre davor? Welche Mechanismen sind für die auffälligen Klimaschwankungen verantwortlich, die von einem Jahr zum nächsten oder auch über mehrere Jahre hinweg auftreten? Macht es überhaupt Sinn, komplexe Klimamodelle aufstellen zu wollen, um die Einwirkungen des Menschen auf das Klima zu berechnen, wenn man nicht einmal diese fundamentalen natürlichen Phänomene erklären kann?

Zur Beantwortung dieser Fragen haben wir damals einige sehr einfache Modellvorstellungen entwickelt in Anlehnung an die Brownsche Bewegung (die Zufallsbewegung großer Moleküle, die durch kleinere Moleküle in einer Lösung angestoßen werden). Nach diesen Vorstellungen entstehen langperiodische Klimaschwankungen durch die Einwirkung vieler kleiner kurzzeitiger »Impulse«, die von der natürlichen Wettervariabilität der Atmosphäre ausgehen, auf die trägen Komponenten des Klimasystems, insbesondere auf den Ozean und die Kryosphäre. Das Klima

---

Abb. 4. Vergleich einer El-Niño-Klimaschwankung mit ihrer Computerberechnung: *Oben* die beobachteten Verteilungen der Oberflächentemperatur im tropischen Pazifik unter normalen Bedingungen im April 1982, *mitte* die beobachteten Verteilungen der Oberflächentemperatur ein Jahr später, im April 1983, nach Ausbruch eines El Niño um die Jahreswende 1982/83, *unten* eine Vorhersage der Temperaturverteilungen für den gleichen Zeitpunkt, doch im nachhinein berechnet mit einem gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modell, ausgehend vom Anfangszustand der Grafik oben (April 1982). Leider gelingen nicht alle Vorhersagen so gut wie diese. Die Temperaturskala reicht von 20,5°C (*blau*) über 25,5°C (*gelb*) bis 29,5°C (*dunkelrot*). – Die großräumigen Temperaturanomalien im tropischen Pazifik während eines El-Niño-Ereignisses führen zu globalen Störungen der atmosphärischen Zirkulation, die sich in diesem Fall z.B. auch durch anomales Wetter in Europa bemerkbar machten (M. Latif, MPI für Meteorologie)



schwankt, bildlich gesprochen, wie eine Schaukel im Wind, wobei der Verlauf der Schwankungen nicht durch den Wind, sondern durch die Dynamik der Schaukel (d.h. des Ozeans, der Eisschilde usw.) bestimmt wird.

Erst nachdem die grundsätzliche Richtigkeit dieser Konzeption in mehreren Datenstudien bestätigt und die Bedeutung der Kopplung der Atmosphäre mit dem Ozean und den restlichen trägen Komponenten des Klimasystems nochmals unterstrichen wurde, haben wir uns verstärkt der Entwicklung komplexer Modelle der einzelnen Klima-Subsysteme zugewandt.

Neuerdings haben wir diese einfachen Grundvorstellungen mit inzwischen vorliegenden, wesentlich realistischeren Modellen wieder aufgegriffen, wobei neben der Zufallsanfächung durch die Atmosphäre nun auch die dynamischen Vorgänge in den einzelnen Klima-Subsystemen im Detail berücksichtigt werden können. Es besteht heute die begründete Hoffnung, daß gewisse Formen natürlicher Klimaschwankungen im kurzperiodischen Bereich von einigen Monaten bis Jahren mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen vorhergesagt werden können. Hierzu gehört insbesondere das bekannte El-Niño-Phänomen, das alle paar Jahre durch großräumige Anomalien der Meerestemperatur im tropischen Pazifik ausgelöst wird und sich auf die gesamte atmosphärische Zirkulation auswirkt (Abb. 4).

Heute liegt eine weitgehend vollständige Hierarchie von Klimamodellen vor, die am neu errichteten Deutschen Klimarechenzentrum in Hamburg für ein breitgefächertes Spektrum von Klimauntersuchungen von einer Vielzahl von Forschungsgruppen benutzt werden. Diese Entwicklung geht weit über den anfänglichen Rahmen der Arbeiten am Max-Planck-Institut hinaus. Sie muß in erster Linie als Verdienst des im folgenden näher beschriebenen Klimaforschungsprogramms der Bundesregierung gerechnet werden.

## **Prozeßstudien und Datengewinnung, Datenanalyse und Modellierung – das deutsche Klimaforschungsprogramm**

Die Ausweitung der ursprünglich nur von einigen wenigen, weitgehend unabhängigen Gruppen betriebenen Klimaforschung zu einem übergreifenden, koordinierten Forschungsprogramm, an dem sich eine große Zahl von Forschungsgruppen in den verschiedensten Disziplinen beteiligt, erfolgte Anfang der 80er Jahre durch das Klimaforschungsprogramm der Bundesregierung unter Federführung des Bundesministers für Forschung und Technologie. Vorbereitet und wesentlich mitgetragen wurde dieses Programm durch Forschungsschwerpunkte und Sonderforschungsbereiche der DFG, die die Forschung an den Universitäten förderte, sowie durch Klimaforschungsarbeiten an Großforschungseinrichtungen und Max-Planck-Instituten.

Neben dem größten Teilbereich »Globale Klimamodellierung und Klimadiagnostik« umfaßt das Klimaforschungsprogramm sechs weitere Teilbereiche (Strahlung und Wolken, mesoskalige Modelle, Kryosphäre, Landoberfläche sowie terrestrische und marine Paläoklimatologie), in denen anhand von Daten und speziellen Modellstudien die wichtigsten Prozesse im Klimasystem studiert und dann in entsprechend verbesserter Darstellung in die globalen Klimamodelle eingebracht werden.

Die enge Wechselbeziehung zwischen Prozeßstudien, Datengewinnung, Datenanalyse und Modellierung erwies sich als außerordentlich fruchtbar und spielte eine entscheidende Rolle in der schnellen Entwicklung der Klimaforschung. Ein Beispiel, das eine instruktive Brücke zwischen vorgeschichtlichen Studien des Paläoklimas und den heutigen Problemen der anthropogenen Klimaänderung schlägt, mag die vielschichtige Form dieser Wechselwirkung ver-

anschaulichen. Eine Schilderung der eindrucksvollen Rekonstruktion des vergangenen Klimas aus Tiefsee- und Eisbohrkernen, Korallen, Baumringen, Seeablagerungen und anderen geologischen Befunden durch die moderne Paläoklimatologie würde hier zu weit führen (siehe hierzu auch den Aufsatz von Eugen Seibold). Aber einer der aufregendsten paläoklimatischen Befunde der letzten Jahre war die Entdeckung durch schweizerische, französische und sowjetische Wissenschaftler, einer hohen Korrelation zwischen den Klimaänderungen der Vergangenheit und dem früheren  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre (den sie aus diffizilen Messungen an im Eis eingeschlossenen kleinen Luftbläschen bestimmten). Während der gesamten unregelmäßigen Folge von Eiszeiten, Zwischeneiszeiten und Warmperioden der letzten 160 000 Jahre fanden sie eine völlig parallele Änderung des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Gehalts und des Klimas. In wärmeren Klimaepochen war die  $\text{CO}_2$ -Konzentration stets wesentlich höher (bis zu einem Drittel) als in kalten Epochen.

Ob die  $\text{CO}_2$ -Schwankungen allerdings Folge oder Ursache der Klimaänderungen waren, konnte bisher nicht geklärt werden. Die meisten der zahlreichen Erklärungsversuche führen die Änderung des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Gehalts auf Veränderungen der  $\text{CO}_2$ -Speicherung im Ozean zurück. Dieser enthält nämlich etwa 60mal soviel  $\text{CO}_2$  wie die Atmosphäre und stellt somit den weitaus größten Speicher im Kohlenstoffkreislauf der Erde dar.

Mit Hilfe eines globalen Modells für den Kohlenstoffkreislauf, das die Transporte und die Speicherung des  $\text{CO}_2$  im Ozean mit hoher Auflösung realistisch nachbildet, konnten im Rahmen des Klimaforschungsprogramms die verschiedenen Hypothesen im einzelnen überprüft werden. Als wirksamste Mechanismen stellten sich dabei die Verringerung der Meerestemperatur und ein Umstellen der ozeanischen Zirkula-

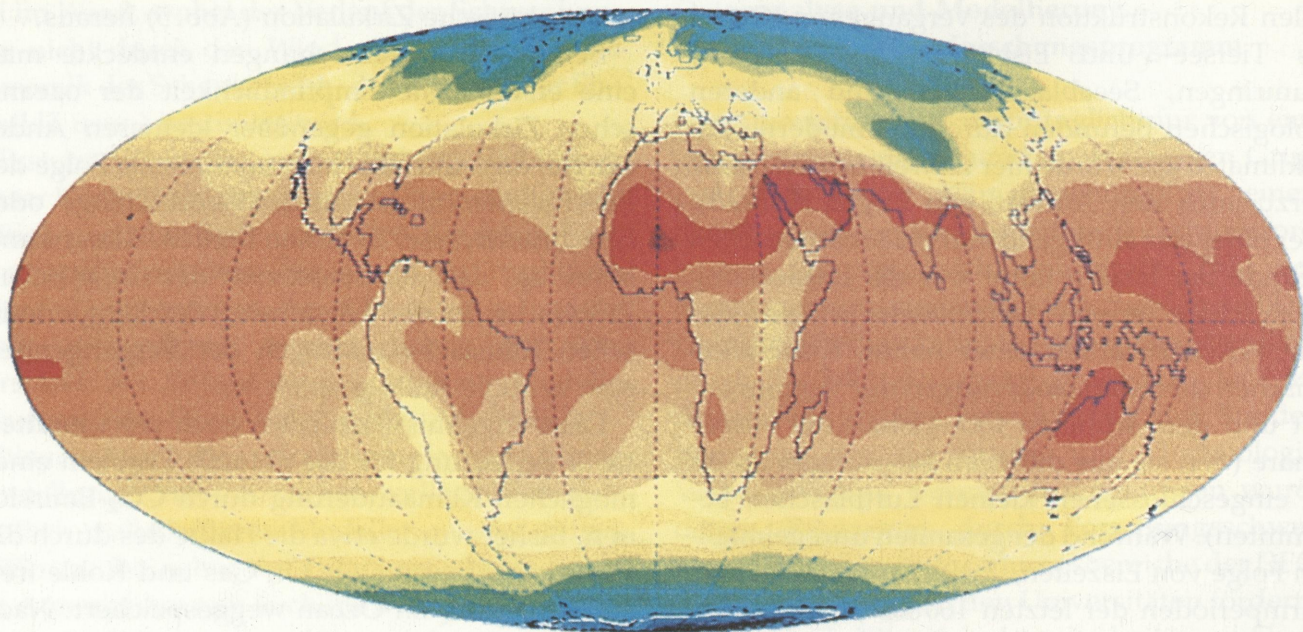
tion infolge des veränderten Antriebs durch die atmosphärische Zirkulation (Abb. 5) heraus.

Bei diesen Untersuchungen entdeckte man eine erstaunliche Empfindlichkeit der ozeanischen Zirkulation gegenüber kleineren Änderungen des Antriebs, insbesondere als Folge der Frischwasserzufuhr durch Niederschläge oder Eisschmelzwasser in hohen Breiten. Man nimmt heute an, daß die Sensitivität der ozeanischen Zirkulation in der Entstehung der langperiodischen Klimaschwankungen der Vergangenheit eine zentrale Rolle gespielt hat.

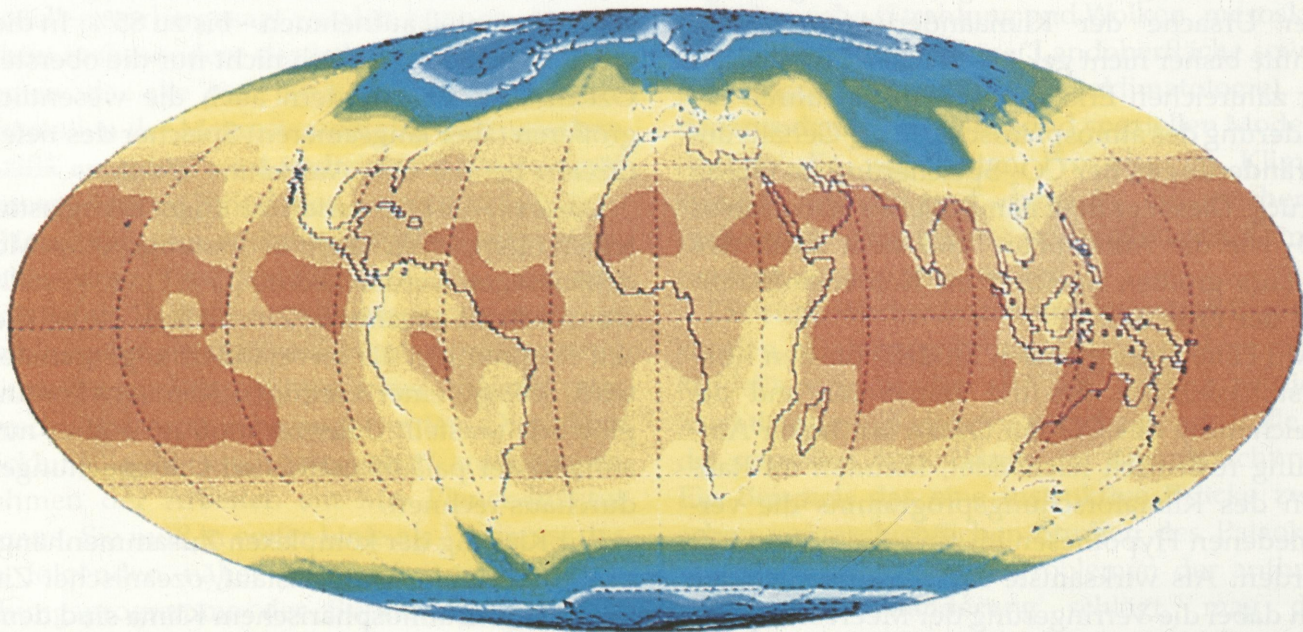
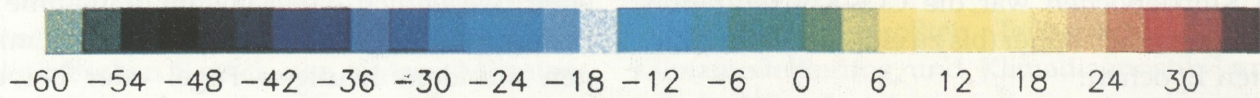
Diese Ergebnisse sind aber auch von unmittelbarer Bedeutung für das aktuelle Problem einer möglichen Klimaänderung durch  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Bisher wurde etwa die Hälfte des durch die Energiegewinnung aus Öl, Gas und Kohle freigesetzten  $\text{CO}_2$  im Ozean weggespeichert. Nach Rechnungen mit dem erwähnten Kohlenstoffkreislaufmodell könnte der Ozean jedoch bei einer wesentlich langsameren Zunahme der Emissionen – z.B. beim »Einfrieren« der Emissionen auf dem heutigen Pegel oder bei einer Emissionsabnahme – einen wesentlich höheren Emissionsanteil aufnehmen – bis zu 85%. In diesem Fall würden nämlich nicht nur die obersten Ozeanschichten, sondern auch die wesentlich größeren (aber langsameren) Speicher des tiefen Ozeans bei der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme »greifen«.

Diese für die Diskussion künftiger Energiestrategien offensichtlich sehr bedeutungsvollen Modellaussagen werden allerdings in Frage gestellt, wenn sich die ozeanische Zirkulation, die bei diesen Rechnungen als unverändert angenommen wird, infolge einer künftigen Klimaerwärmung plötzlich umstellt. Hiermit muß man aber nun anhand der paläoklimatischen Untersuchungen durchaus rechnen.

Zur Klärung der komplexen Zusammenhänge zwischen Kohlenstoffkreislauf, ozeanischer Zirkulation und atmosphärischem Klima sind demnach aufwendige numerische Experimente mit



Temperaturskala in Celsius



gekoppelten Modellen des Gesamtsystems erforderlich. Inzwischen liegen die notwendigen Modelle zur Untersuchung dieser Fragen am Deutschen Klimarechenzentrum vor (in dieser Kombination sogar einmalig), und es wird zur Zeit im Rahmen des nationalen Klimaforschungsprogramms in einem gemeinsamen Vorhaben mehrerer Institute ein umfangreiches Simulationsprogramm durchgeführt.

Daß wir heute in der Lage sind, Probleme dieser Komplexität in Angriff zu nehmen, verdanken wir neben einem breitgefächerten Ausbau der Grundlagenforschung auch der Entwicklung einer leistungsfähigen Infrastruktur. Insbesondere ist hier die Gründung des Deutschen Klimarechenzentrums zu nennen, einer von den Gesellschaftern Max-Planck-Gesellschaft, Freie und Hansestadt Hamburg (vertreten durch die Universität Hamburg) und GKSS-Forschungszentrum Geesthacht gemeinsam betriebenen, zum überwiegenden Teil vom Bundesministerium für Forschung und Technologie getragenen Einrichtung mit zentralen Service-Aufgaben und Koordinierungsfunktionen für die gesamte Klimaforschung. Hierdurch ließen sich die verschiedenen Modellentwicklungen an den einzelnen Instituten zu einem abgestimmten, gemeinsamen Forschungsprogramm mit anspruchsvollen Zielvorstellungen zusammenführen.

---

Abb. 5. Simulation der Jahresmittel-Erdoberflächentemperatur heute (*oben*) und unter eiszeitlichen Bedingungen vor 18000 Jahren (*unten*), jeweils für 5 Jahre Modellzeit. Benutzt wurde die Hamburger Version des atmosphärischen Zirkulationsmodells des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage. Die globale Abkühlung zur letzten Eiszeit zeigt im Modell eine ähnliche Struktur und liegt in der gleichen Größenordnung wie die globale Erwärmung, die bei einer Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration vorausgesagt wird – nur eben mit umgekehrten Vorzeichen (M. Lautenschlager, MPI für Meteorologie, und U. Schlese, Meteorologisches Institut der Universität Hamburg)

Trotz der eindrucksvollen Entwicklung der letzten Jahre stehen wir aber heute erst an der Schwelle der eigentlichen Klimamodellierung mit hochauflösenden, realistischen Modellen des Gesamtklimasystems. Bisher basieren fast alle publizierten Prognosen über anthropogene Klimaänderungen noch auf atmosphärischen Modellen – ohne hinreichende Berücksichtigung der Veränderungen des Ozeans, der Eisflächen oder der Landvegetation. Untersuchungen der natürlichen Klimavariabilität wurden bisher ebenfalls weitgehend nur mit stark vereinfachten gekoppelten Klimamodellen durchgeführt.

Durch die rapiden Fortschritte der Modellierung verfügen aber einige der weltweit führenden Klimaforschungszentren nunmehr über ähnlich vollständige Modellhierarchien wie das Deutsche Klimarechenzentrum. Wir können in den kommenden Jahren gespannt sein auf neue Simulationsergebnisse mit wesentlich realistischeren gekoppelten Modellen des gesamten Klimasystems – wobei wir erwarten dürfen, daß das Klimaforschungsprogramm der Bundesrepublik wesentlich hierzu beitragen wird.

### **Ausblick – Anwendungsaufgaben und Grundlagenforschung**

Wenn in diesen Ausführungen die Klimamodellierung stark im Vordergrund stand, liegt das in der Natur der Klimaforschung. Sowohl beim aktuellen Problem einer möglichen anthropogenen Klimaänderung als auch in der – wirtschaftlich ebenfalls bedeutungsvollen – Frage nach den Ursachen und der möglichen Vorhersagbarkeit natürlicher Klimaschwankungen ist die Klimaforschung letztlich auf das Ziel der Prognose ausgerichtet – und dafür braucht man eben Modelle.

Nachdem die Werkzeuge für verbesserte Prognosen in Form einer Vielzahl realistischer

hochauflösender Modelle in den letzten Jahren weitgehend bereitgestellt wurden, wird man diese in Zukunft auch wesentlich stärker für diese Aufgabe einsetzen wollen – und müssen –, um die von der Gesellschaft und den politischen Entscheidungsträgern immer drängender gestellten Fragen mit den besten zur Verfügung stehenden Mitteln zu beantworten. Voraussichtlich wird man hierzu spezielle, auf operationelle Arbeiten ausgerichtete Gruppen einsetzen müssen.

Parallel zu diesen wichtigen Anwendungsaufgaben müssen aber die Bemühungen um den Ausbau der Grundlagenforschung, der Klimadatengewinnung und der kontinuierlichen Klimaüberwachung stetig und langfristig fortgesetzt werden. Es steht zuviel auf dem Spiel, um sich mit dem Erreichten zufriedengeben zu können. Hierzu gehören z.B.

- die Beteiligung an größeren internationalen Experimenten, wie dem World Ocean Circulation Experiment (WOCE), ein umfangreiches, 5–10jähriges Projekt zur Klärung der Rolle des Ozeans im Klimasystem, sowie
- die aktive Mitwirkung an der Errichtung eines umfassenden globalen Systems von Erdbeobachtungssatelliten zur Gewinnung globaler meteorologischer, ozeanischer und Spurengasdaten.

Schon bei der Auslegung künftiger Erdbeobachtungssatelliten wird allerdings deutlich, daß das Klimaproblem heute nicht mehr sinnvoll vom umfassenden Komplex der Umweltproblematik getrennt werden kann. Spurengasmessungen sind nicht nur zur Erfassung der Treibhauskomponenten erforderlich, sondern auch für Untersuchungen und zur Überwachung der Luftverschmutzung und des Waldsterbens. Änderungen der Ozonkonzentration betreffen wegen der Treibhauswirkung des Ozons sowohl das Klima als auch die Biosphäre und den Menschen unmittelbar: Die Zunahme des troposphä-

rischen Ozons in industrienahen Gebieten verstärkt die Klimaerwärmung und trägt zum Waldsterben bei, während der Abbau des stratosphärischen Ozons oberhalb 15 km – am antarktischen Ozonloch dramatisch dokumentiert – den lebenswichtigen Schutz des Menschen und der Biosphäre vor UV-Strahlung gefährdet.

Unterstrichen wird die enge Beziehung zwischen Luftchemie und dem Klimaproblem durch die beobachtete rapide Zunahme der atmosphärischen Konzentrationen mehrerer chemisch aktiver Treibhausgase (z.B. Methan, Lachgas, FCKW), die früher weniger Beachtung fanden, aber mittlerweile in ihrer Summe etwa den gleichen Beitrag zum Treibhauseffekt liefern wie das CO<sub>2</sub> allein.

Auch die Ökologie ist mit dem Klima auf vielfältige Weise eng verknüpft. Neben dem Ozonproblem ist hier besonders die rapide Vernichtung der tropischen Regenwälder zu nennen. Ihr Beitrag zur weltweiten CO<sub>2</sub>-Emission wird schon heute auf ca. 20% geschätzt, aber noch gefährlicher sind die ökologischen Auswirkungen: Man schätzt, daß über die Hälfte der Lebensarten unserer Erde durch die Vernichtung ihrer Lebensbedingungen in den Tropen bedroht sind.

Die geplante Erweiterung der Klimaforschung zu einem umfassenden multidisziplinären Komplex zur Erfassung des »Systems Erde« im neuen »Internationalen Geosphären-Biosphären-Programm« wird nicht einfach sein. Wie zu Anfang der Klimaforschung vor etwa 15 Jahren stehen ausgereifte Modelle zur Untersuchung des erweiterten »Systems Erde« nicht zur Verfügung, und viele der grundlegenden Wechselwirkungen sind noch nicht verstanden. Es wäre zu begrüßen, wenn Wissenschaftler und Forschungsträger dieses wichtige neue Forschungsgebiet gemeinsam mit der gleichen Kreativität, Weitsicht und Tatkraft erschließen würden, die sie bereits beim erfolgreichen Aufbau der Klimaforschung bewiesen haben.