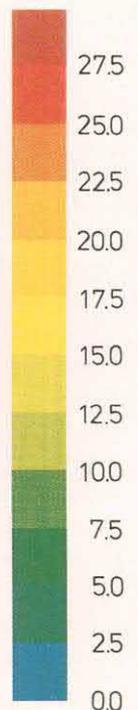
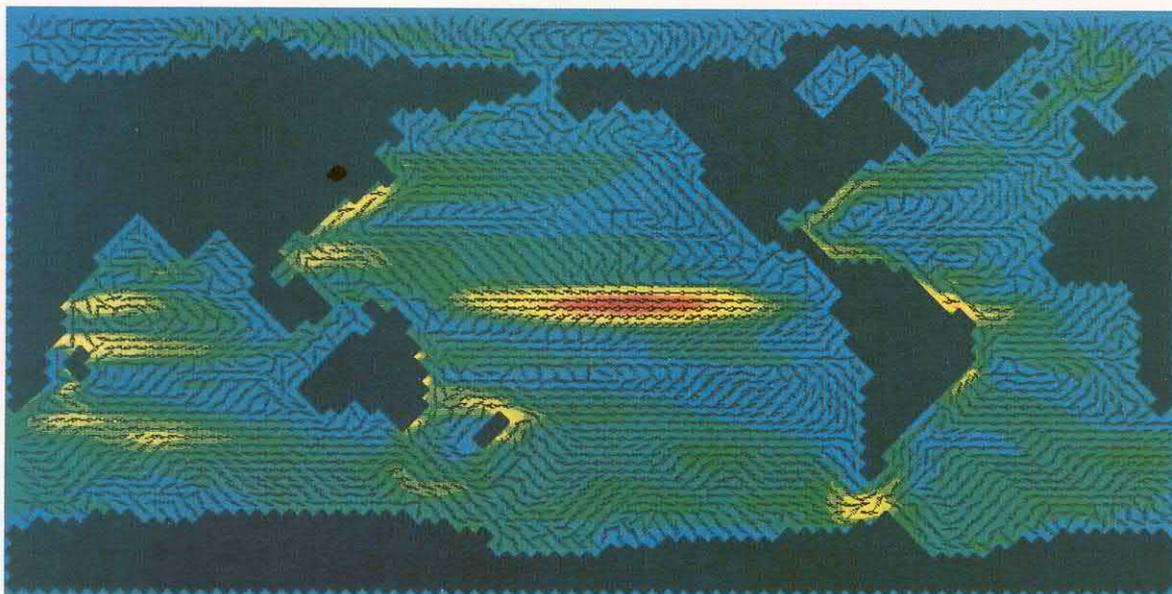


promet

1/2/3 '88

meteorologische fortbildung

Das Max-Planck-Institut für Meteorologie



cm/s

1 Fragestellungen

Die Gefahr einer möglichen Änderung des Klimas durch den Menschen hat das Klimaproblem in letzter Zeit zunehmend in das Blickfeld der Öffentlichkeit gerückt. Im Mittelpunkt der Diskussion steht das CO₂-Problem. Bei Fortsetzung der bisherigen Trends der CO₂-Emissionen sagen Modellrechnungen eine globale Erwärmung um 2-4° C in den nächsten 50-200 Jahren voraus, mit entsprechenden, signifikanten Verschiebungen der Klimazonen. Die Schwankungsbreiten dieser Prognosen ergeben sich dabei nicht nur aus der Unsicherheit des künftigen Verbrauchs fossiler Brennstoffe, sondern nicht zuletzt aus der Schwierigkeit, zuverlässige Klimaberechnungen zu erstellen. Das CO₂-Problem bietet ein gutes Beispiel, diese Schwierigkeiten zu erläutern, da viele der komplexen Wechselwirkungen des Klimasystems hierin zusammenspielen.

Zur Berechnung der Klimaauswirkung der anthropogenen CO₂-Emission muß zunächst der Verbleib des CO₂ im Kohlenstoffkreislauf ermittelt werden. Nur der atmosphärische Anteil (etwa die Hälfte der bisherigen Emissionen) beeinflusst über den Treibhauseffekt unmittelbar das Klima. Zur zuverlässigen Ermittlung des etwa gleichgroßen Anteils, der im Ozean weggespeichert wird, wird ein ozeanisches Kohlenstoffkreislaufmodell benötigt, das neben dem Transport und der Speicherung von CO₂ durch die dreidimensionale ozeanische Zirkulation die vielfältigen biologischen und chemischen Umsetzungsprozesse des CO₂ im Ozean berücksichtigt. Zur Schließung der CO₂-Bilanz muß dann weiterhin die Aufnahme oder Abgabe von CO₂ durch die Vegetation der Landoberfläche mit Hilfe eines globalen, räumlich hochauflösenden terrestrischen Biosphärenmodells berechnet werden.

Als nächsten Schritt wird man dann die Auswirkung der atmosphärischen CO₂-Änderung auf das Klima mit einem allgemeinen Klimamodell ermitteln wollen. Dies sollte zumindest aus einem hochauflösenden gekoppelten Modell der globalen atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation bestehen. Wegen technischer Schwierigkeiten der Kopplung, insbesondere wegen der langen Einstellzeit der ozeanischen Zirkulation (etwa 10 Jahre für die 1 km starke oberste Hauptsprungschicht, bis zu 1000 Jahre für den tiefen Ozean) wurden solche Rechnungen allerdings bisher nur mit atmosphärischen Zirkulationsmodellen, ohne ausreichende Berücksichtigung des Ozeans, durchgeführt. Der Einfluß einer Änderung der ozeanischen Zirkulation auf das Klima, obwohl ein Effekt erster Ordnung, wird gewöhnlich erst nachträglich in einer unabhängigen Simulation abgeschätzt. Schließlich mußte dann auch die Rückwirkung der ozeanischen Zirkulationsänderungen auf die CO₂-Speicherung im Ozean und somit auf die anfangs berechnete CO₂-Konzentration der Atmosphäre einbezogen werden.

Diese iterative Vorgehensweise ließe sich natürlich umgehen, wenn alle ineinandergreifenden Komponenten des Klimasystems simultan in einem gekoppelten Gesamtmodell berechnet werden könnten. Bisher sind jedoch für das CO₂-Problem weder geschlossene interaktive Berechnungen noch

vollständige Simulationen mit gekoppelten Modellen durchgeführt worden. Fortschritte in der Entwicklung der einzelnen Subsystem-Modelle, in der Technik der Modellkopplung und, nicht zuletzt, in der Leistung großer Vektorrechner, lassen es aber heute sinnvoll erscheinen, beide Modellierungsstrategien ernsthaft zu verfolgen. In den Beiträgen 4, 5 und 6 werden einige der am Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickelten Modelle und Arbeitsansätze vorgestellt, mit denen das Institut sich in Zukunft diesen Problemen verstärkt widmen will.

Zusätzlich zum CO₂ wurde in den letzten Jahren die Gefahr der steigenden Emissionen einer Reihe weiterer treibhauswirksamer Spurengase wie Methan, Lachgas und den Chlorfluorkohlenwasserstoffen (CFKWs) erkannt. In ihrer Summe tragen diese Gase noch einmal fast den gleichen Beitrag zur Klimaerwärmung bei wie das CO₂. Viele dieser Gase, insbesondere die CFKWs, greifen auch stark in die komplexe Ozonchemie ein. Obwohl Ozon in erster Linie für den Menschen und die Biosphäre wegen seiner Abschirmung der UV-Strahlung von Bedeutung ist, trägt es als Treibhausgas nach einigen Szenarien auch etwa 10% zur prognostizierten Klimaerwärmung bei. Photochemische Modelle zur Berechnung von atmosphärischen Spurengaskonzentrationen wurden bisher nicht am MPI entwickelt, obwohl sie einen wichtigen Teil der Klimamodellhierarchie darstellen, da diese Arbeiten bereits an anderen Stellen durchgeführt werden (u.a. Mainz, Lindau, Berlin und Jülich).

Ein großes öffentliches Interesse fanden seit jeher auch Fragen der natürlichen Klimaveränderlichkeit. Wie entstehen Eiszeiten? Steuern wir wieder auf eine Eiszeit zu? Können Erdbahnschwankungen mit wohldefinierten Perioden von 20- und 40.000 Jahren, die sich in gefilterten paläoklimatischen Zeitreihen deutlich nachweisen lassen, auch die beobachteten stärkeren Klimaschwankungen im spektralen Kontinuum außerhalb dieser schmalen Spektralbanden anregen (Beitr. 7)? Auch weniger ausgeprägte, aber historisch bedeutsame Klimaschwankungen im kürzeren Zeitskalenbereich von einigen hundert Jahren, wie die kleine Eiszeit im 17. und 18. Jahrhundert, stellen die Wissenschaft noch vor viele nicht verstandene Fragen. Von großer wirtschaftlicher Bedeutung sind schließlich kurzperiodische Klimaänderungen im Zeitskalenbereich von Monaten bis wenigen Jahren, wie das El-Niño-Phänomen, eine großskalige Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre, die den gesamten Tropengürtel umfaßt und sich auf die globale atmosphärische Zirkulation auswirkt (Beitr. 3). Nach heutigem Wissensstand erscheint eine erfolgreiche Kurzfrist-Klimavorhersage dieser Phänomene, deren ökonomische Bedeutung mit der der normalen Wettervorhersage durchaus vergleichbar wäre, nicht ausgeschlossen. (Die neuere Definition unterscheidet Klima und Wetter durch ihre Zeitskalen: zum Klima zählen Phänomene mit Zeitskalen größer als die theoretische Grenze der deterministischen Wettervorhersage, die auf etwa 20-30 Tage geschätzt wird.)

Wissenschaftlich lassen sich Fragen der anthropogenen Beeinflussung des Klimas und der natürlichen Klimaverän-

derlichkeit nicht sinnvoll voneinander trennen. In beiden Fällen sind die gleichen Prozesse wirksam, und es werden weitgehend die gleichen Modelle eingesetzt. Auch in der Fragestellung lassen sich die Probleme nicht klar voneinander trennen. Ein wichtiges Problem der anthropogenen Klimabeeinflussung liegt z. B. in der möglichst frühzeitigen Erkennung einer anthropogenen Klimaänderung. Die Unterscheidung eines von außen aufgeprägten anthropogenen Klimasignals von der natürlichen Klimaveränderlichkeit setzt eine detaillierte Kenntnis des natürlichen Schwankungsverhaltens des Klimas voraus. In numerischen Simulationen kann diese Frage nur mit Modellen sinnvoll untersucht werden, die sowohl die natürliche Klimaveränderlichkeit als auch die Antwort des Klimasystems auf externe Einwirkungen simultan berücksichtigen. Ein anderes Beispiel bieten neuere Ergebnisse über Änderungen des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre während der letzten 130.000 Jahre, die anhand von CO₂-Messungen an eingeschlossenen Luftbläschen in Eisbohrkernen rekonstruiert wurden. Man fand einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Änderungen des Klimas und des atmosphärischen CO₂-Gehalts in diesem Zeitskalenbereich, der auch zum Verständnis des heutigen CO₂-Problems von großer Bedeutung sein könnte.

2 Modellierungsstrategie

Aus den obigen Beispielen wird deutlich, daß es keinen Sinn hat, die Erstellung eines einzigen, umfassenden Gesamtklimamodells für sämtliche Klimafragen anzustreben. Die Leistung heutiger und in Zukunft absehbarer Rechner reicht bei weitem nicht aus, um alle wechselseitigen Kopplungen der vier wichtigsten Untersysteme Atmosphäre-Ozean-Kryosphäre-Biosphäre des Klimasystems auch nur annähernd wirklichkeitsgetreu zu erfassen. Benötigt wird eine Hierarchie von Modellen, in denen, je nach Fragestellung, einige Prozesse mit höherer Auflösung, während andere Prozesse stark vereinfacht wiedergegeben werden. Die optimale Modellabstimmung ergibt sich in erster Linie aus den relevanten Zeitskalen. Bei Kurzzeitklimaproblemen mit Zeitskalen unter einigen Jahren wird man die Atmosphäre, die ozeanische Deckschicht und das Meereis realistisch simulieren. Mit zunehmender Zeitskala müssen dann zunächst die globale ozeanische Zirkulation und die Biosphäre (Zeitskalen von 1-10³ Jahren) und schließlich die kontinentalen Eisschilde (Zeitalter von 10³-10⁵ Jahren) im Detail dargestellt werden, während die *schnellen* Systeme dann notgedrungen stark vereinfacht behandelt werden müssen.

Als Bausteine für die Klimamodellierung wird somit ein Spektrum von Modellen der einzelnen Klimasubsysteme benötigt, die, je nach Fragestellung, in unterschiedlichen Kombinationen zusammengeschaltet werden. In den letzten Jahren wurde ein relativ vollständiger Satz hochauflösender Modelle der einzelnen Subsysteme am MPI erstellt. Neben den bereits erwähnten Modellen des ozeanischen, terrestrischen und atmosphärischen Kohlenstoffkreislaufes und der globalen atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation, wurden Modelle entwickelt zur Simulation des Meereseises (Beitr. 8) und der dreidimensionalen Fließ- und Thermodynamik der kontinentalen Eisschilde (Beitr. 7), sowie zur Untersuchung einzelner Prozesse im Klimasystem (wirbelauflösende ozeanische Zirkulationsmodelle, Beitr. 4, Deckschichtmodelle, Beitr. 8, Konvektionsmodelle, s. Bei-

träge 11-14 zur Physik der Atmosphäre). Einige Modelle, wie z. B. das atmosphärische Zirkulationsmodell des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage und das Hiblersche Meereismodell, wurden hierbei von anderen Stellen übernommen.

Klimauntersuchungen mit gekoppelten, hochauflösenden Modellen werfen eine Reihe neuer Probleme auf. Hierzu gehört z. B. die *Modelltrift*. Im gekoppelten Modell werden die Randwerte der einzelnen Subsysteme nicht mehr, wie im ungekoppelten Fall, als stabilisierende Referenzgrößen extern vorgeschrieben, sondern intern berechnet. Infolgedessen trift das Modell leicht in ein neues, unrealistisches Klimagleichgewicht. Auch die Behandlung der stark unterschiedlichen Zeitaufösungen der einzelnen Subsysteme in einem gekoppelten Modell erfordert neue numerische Ansätze. Die folgenden Beiträge enthalten sowohl einige Pilotuntersuchungen mit gekoppelten Systemen (Beitr. 3, 7, 8), in denen diese Fragen angesprochen werden, als auch Darstellungen der einzelnen Subsystemmodelle, die später in gekoppelte Modelle eingesetzt werden sollen (Beitr. 4, 5, 6).

3 Stochastische Modelle und statistische Analysemethoden

In den ersten Jahren nach der Institutsgründung wurden in erster Linie grundsätzliche Fragen zum Verhalten komplexer Systeme mit vielen Freiheitsgraden untersucht. Mit einfachen stochastischen Modellen konnten die wichtigsten statistischen Eigenschaften natürlicher Klimaschwankungen auf die zeitliche Mehrskaligkeit des Klimasystems zurückgeführt werden. Die charakteristische Zunahme natürlicher Klimavariationspektren mit abnehmender Frequenz (*rotes* Spektrum) wurde erklärt durch die Aufintegration von kurzzeitigen Wetterschwankungen (*weißes* Rauschen) durch die trägen Komponenten des Klimasystems (Ozean, Kryosphäre und Biosphäre). Diese zunächst an einfachen ozeanischen Deckschicht- und Meereismodellen verifizierten Vorstellungen werden inzwischen auf hochauflösende dreidimensionale Modelle übertragen (Beitr. 9). Für die Bestimmung der Vorhersagbarkeit natürlicher Klimaänderungen ist die Ermittlung dieser durch stochastische Anfaltungen erzeugten Schwankungen eine zentrale Frage. Während Klimaänderungen, die durch interne Wechselwirkungen in den trägen Systemkomponenten hervorgerufen werden, im Prinzip vorhersagbar sind, können die stochastischen Anfaltungsterme nämlich grundsätzlich nicht vorausberechnet werden.

Zur Untersuchung des vollständigen statistischen Schwankungsverhaltens komplexer Systeme müssen im allgemeinen aufwendige multivariate Analyseverfahren eingesetzt werden. Mit der am MPI entwickelten PIPs- und POPs-Methode wurde eine komprimierte Darstellung gesucht, bei der das komplexe raum-zeitliche Schwankungsverhalten des Systems auf einige charakteristische Muster (Principal Interaction Patterns und Principal Oscillation Patterns) projiziert wird. Das Verfahren liefert zugleich ein dynamisches Näherungsmodell des vollständigen Systems in dem von den PIP- oder POP-Mustern aufgespannten niederdimensionalen Darstellungsraum (Beitr. 9).

Eine weitere wichtige Frage, die in den Bereich der statistischen Analyse von zeitlich veränderlichen Systemen mit

vielen Freiheitsgraden führt, ist die Ermittlung der statistischen Signifikanz einer aus Beobachtungsdaten oder einer Modellsimulation ermittelten Klimaänderung. Das Problem besteht darin, das durch externe Einwirkungen (s. z. B. CO₂) oder durch ein bestimmtes Ereignis (z. B. El Niño) hervorgerufene Klimasignal von den gleichzeitig auftretenden natürlichen Schwankungen des Systems zu unterscheiden. Auch hier muß zur statistisch gesicherten Ermittlung des Verhältnisses Signal-zu-Rauschen eine Projektion des vollständigen Systems auf einen stark reduzierten Unterraum geeigneter charakteristischer Muster durchgeführt werden. (Beitr. 9).

Systemanalytische und statistische Untersuchungen dieser Art stellen heute mit dem zunehmenden Einsatz komplexer, hochauflösender Klimamodelle ein unerlässliches diagnostisches Werkzeug zur Interpretation von Modellergebnissen oder zum Vergleich zwischen Modell und Beobachtungen dar.

4 Satellitendaten

Grundlage aller Klimastudien sind letztlich Beobachtungsdaten. Während die Atmosphäre durch das globale Stationsnetz der Weltorganisation für Meteorologie und durch meteorologische Satelliten heute hinreichend gut erfaßt wird, stellt der Ozean noch immer eine der empfindlichsten Datenlücken im Klimasystem dar. In den 90er Jahren erhofft man nun, durch das weltweite ozeanische Meßprogramm WOCE (World Ocean Circulation Experiment), unterstützt durch neue ozeanische Satelliten wie den ersten ESA Erderkundungssatelliten ERS-1 und den meerestopographischen Satelliten TOPEX/POSEIDON von NASA/CNES, eine wesentlich bessere Datenbasis für den Ozean zu gewinnen.

Zur Herleitung der gewünschten geophysikalischen Daten (z. B. Meeresoberflächenwind, Meereshöhe) aus den Mikrowellen-Sensordaten dieser Satelliten müssen allerdings aufwendige Reduktionsverfahren entwickelt werden, die unter anderem von der kleinskaligen Struktur der rückstreuenden Meeresoberfläche abhängen. Als Eingangsgrößen benötigen diese Verfahren neben einem von einem

atmosphärischen Modell gelieferten ersten Schätzwert des lokalen Windvektors auch das lokale Seegangsspektrum, das ebenfalls nur mit Hilfe eines Seegangmodells zu erhalten ist. Zur Erstellung der gewünschten globalen Felder müssen die Satellitendaten dann ferner mit allen weiteren hierfür zur Verfügung stehenden meteorologischen und ozeanischen Daten in dynamisch konsistenter Weise zusammengeführt werden. Hierzu werden wieder hochauflösende atmosphärische Zirkulationsmodelle sowie globale Seegangmodelle benötigt. Wegen des kontinuierlich anfallenden großen Datenflusses können die Wind- und Seegangdaten dieser Satelliten operationell nur in einem größeren Wettervorhersagezentrum sinnvoll aufbereitet werden, in dem sowohl ein globales atmosphärisches Zirkulationsmodell als auch ein globales Seegangmodell routinemäßig zur Datenassimilation als Teil der laufenden Vorhersage eingesetzt werden.

Das Max-Planck-Institut beteiligt sich aktiv im Rahmen des „Global Data Assimilation Programme for Air-Sea Fluxes“ des Weltklimaforschungsprogramms an der Erstellung eines entsprechenden umfassenden Datenassimilationsystems am Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage. Hierzu gehört insbesondere die Bereitstellung eines globalen Seegangmodells in Zusammenarbeit mit der WAM (Wave Modelling) Gruppe (WAMDIG 1988) und die Erarbeitung geeigneter Sensor-Algorithmen und Satellitendaten-Assimilationsverfahren (HASSELMANN et al 1988). Auf eine ausführlichere Darstellung dieser Arbeiten muß jedoch aus Platzgründen in diesem Heft verzichtet werden.

Literatur

- WAMDIG, The Wave Model Development and Implementation Group (1988). The WAM model – a third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.* (im Druck).
- HASSELMANN, K.; S. HASSELMANN; E. BAUER; C. BRÜNING; S. LEHNER; H. GRÄBER; P. LIONELLO (1988): Satellite SAR image spectra and altimeter wave height data assimilation system for ERS-1. Final report, ESA contract no. 6875/87/HGE I (SC).