

Max-Planck-Institut für Meteorologie

Hamburg

Gegründet 1975 zur Erforschung der physikalischen Grundlagen des Klimas. Das Institut besteht aus zwei unselbständigen Abteilungen. Eine Abteilung (Hasselmann) befaßt sich mit allgemeinen Fragen der Klimadynamik, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen im System Atmosphäre-Ozean-Eis; die andere (Hinzpeter) untersucht vorwiegend Prozesse in der Atmosphäre, insbesondere in der unteren Grenzschicht.

Direktor, Wissenschaftliches Mitglied:

Prof. Dr. Klaus Hasselmann

Direktor am Institut,

Wissenschaftliches Mitglied:

Prof. Dr. Hans Hinzpeter

44 Mitarbeiter, davon 15 Wissenschaftler, dazu 5 Stipendiaten und 14 Zeithilfen.

Physik des Meeres und Klimadynamik (K. Hasselmann)

Arbeitsgebiete

Veränderlichkeit und Vorhersagbarkeit des Klimas, Klimamodelle. Wechselwirkungen Atmosphäre-Ozean-Eis. Strahlungsbilanz der Atmosphäre. Erfassung kleinskaliger Austauschprozesse in Atmosphäre und Ozean, Grenzschichten, Wärme Konvektion, interne Schwerewellen, Seegang, Turbulenz.

Ergebnisse

Eiszeitliche Klimaschwankungen. Langzeitliche Klimaschwankungen kommen zu-

stande durch die Wechselwirkung der Komponenten Atmosphäre, Ozean und Eis des Klimasystems (interne Klimavariabilität) und durch Veränderlichkeit äußerer Bedingungen (externe Klimavariabilität), wie z.B. die Variation der Sonneneinstrahlung. Da die Form der Erdbahn und die Richtung der Erdachse sich zeitlich ändert, ergeben sich Schwankungen der täglichen Sonneneinstrahlung mit Abhängigkeit von der geographischen Breite und Perioden von 20000 und 40000 Jahren. Es ist erwiesen, daß der Wechsel zwischen Warmzeiten (z.B. heute) und Kaltzeiten (etwa vor 20000 Jahren) teilweise durch Variationen der Sonneneinstrahlung gesteuert wird (Milankowitsch Theorie). Kenntnisse über Klimamäanderungen während der letzten eine Million Jahre stammen hauptsächlich aus der Analyse von Tiefseesedimenten. Da die Einstrahlung als Funktion der Breite und Jahreszeit bis etwa 5 Millionen Jahre zurück berechnet werden kann, ist es möglich, den Zusammenhang zwischen Einstrahlung und Klimaschwankungen zu nutzen, um diese Schwankungen zeitlich zu datieren. Dieses Datierungsproblem soll im folgenden etwas erläutert werden.

In Zusammenarbeit mit der Universität Kiel wurde ein etwa 10m langer Tiefseekern, der aus fast 3000m Wassertiefe vor West-Afrika (20° W, 5° N) geborgen wurde, statistisch analysiert. Aus dem Sauerstoff-Isotopen-Verhältnis $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ in planktonischen Kalkschalen kann z.B. auf das globale Eisvolumen geschlossen werden. Änderungen im Kalkgehalt des Sediments werden auf die Tiefenwasserproduktion und damit auf die See-Eis-Ausdehnung in polaren Breiten zurückgeführt. Schließlich kann aus der Korngrößenverteilung des

in der Tiefsee abgelagerte Saharastaubs auf die Stärke der tropischen Winde geschlossen werden.

Die abgeleiteten Klimasignale liegen zunächst nur als Funktion der Tiefe im Sediment vor. Zur Festlegung der Zeitordnung wurden zwei voneinander unabhängige Wege beschritten. Der eine Weg benutzt ein geologisch begründetes Modell des Sedimentationsprozesses in Verbindung mit einigen radiometrischen Datierungen. Bis zu 50 000 Jahre zurück wird dafür das radioaktive Kohlenstoff-Isotop ^{14}C verwendet und für ältere Sedimente die $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Reihe. Die so gewonnene Zeitserie der Änderung des globalen Eisvolumens ist signifikant mit den Änderungen der Sonneneinstrahlung korreliert. Für diesen Test wurde die Sonneneinstrahlungskurve für Juli bei 65°N ausgewählt, da diese Kurve bereits alle Frequenzen der globalen Sonneneinstrahlung enthält.

Die zweite Methode für die Datierung basiert auf dem oben dargestellten Zusammenhang zwischen Sonneneinstrahlung und Klimasignalen. Es wurde ein linearer statistischer Zusammenhang zwischen diesen Variablen angenommen, bei dem die Modellzeitachse des Bohrkerns durch einige charakteristische Ereignisse parametrisiert wurde. Die Zuordnung der zugehörigen Zeitpunkte wurde dann so bestimmt, daß die Klimazeitserie bei den charakteristischen Perioden maximal mit der Sonneneinstrahlung (Juli, 65°N) korreliert ist. Durch einen statistischen Test wurde gezeigt, daß die erzwungene hohe Korrelation kein Zufallsergebnis ist. Die Unterschiede zwischen den Zeitskalen aus dem geologischen und dem statistischen Modell betragen maximal $\pm 9\%$.

Als Einstieg zur Modellierung der Eiszeiten wurde die globale Sonneneinstrahlung nach räumlichen Orthogonalfunktionen zerlegt. Die Darstellung der raum-zeitlichen Abhängigkeit der Einstrahlung mit Hilfe weniger geordneter Entwicklungsfunktionen erleichtert sowohl die Konstruktion einfacher Klimamodelle als auch die Bestimmung der Modellsignifikanz. Schon mit den ersten

drei Gliedern dieser Reihenentwicklung werden 95% der Variation der globalen Sonnenstrahlung beschrieben. Diese Darstellung der globalen Sonnenstrahlung steht ebenfalls signifikant mit dem sedimentologisch-radiometrisch datierten globalen Eisvolumen in Wechselbeziehung. Mit Hilfe linearer statistischer Analyse konnte allerdings gezeigt werden, daß je nach verwendeter Zeitskala und der ausgewählten Sonneneinstrahlungskurve nur 6 bis 13% der Varianz des Eisvolumens durch lineare Anfachung aus den Schwankungen der Sonneneinstrahlung erklärt werden können. Die großen Schwankungen zwischen den heutigen Klimabedingungen und maximaler Vereisung müssen andere Ursachen haben. Der sägezahnartige Verlauf der Schwankungen des globalen Eisvolumens (langsamer Aufbau des Eises, schnelles Abschmelzen) deutet auf nichtlineare Prozesse im Klimasystem hin. Um Unterschiede im Klimaablauf zwischen Phasen zunehmender Vereisung einerseits und Abschmelzphasen andererseits feststellen zu können, wurden mehrere Klimasignale aus dem Tiefseekern getrennt nach Abkühl- und Aufwärmphasen untersucht. Es zeigt sich, daß sich in Abkühlphasen das Meer-Eis schon etwa 3000 Jahre früher ausbreitet, bevor eine nennenswerte Vereisung der Landflächen einsetzt. Mit zunehmender Vereisung wird auch die allgemeine Windzirkulation stärker. In der Schmelzphase folgt die Windstärke dem Rückzug des Eisvolumens mit ungefähr 5000 Jahren Verspätung. Die oben beschriebenen Methoden zur Datierung sowie zur linearen und nichtlinearen Analyse der Klimasignale sollen nun auf mehrere Tiefseekerne angewandt werden, um auch räumliche Korrelationen zwischen verschiedenen Klimasignalen ableiten zu können (*Bruns, Hertel*).

Veröffentlichungen

Alpers, W., H. J. C. Blume, W. D. Garret and H. Hühnerfuss: The effect of mono-molecular surface films on the microwave brightness tempe-

ature of the sea surface. *Int. J. Remote Sensing* 3, 457–474 (1982).

Alpers, W. and K. Hasselmann: Spectral signal to clutter and thermal noise properties of ocean wave imaging synthetic aperture radars. *Int. J. Remote Sensing* 3, 423–446 (1982).

Brockmann, C., E. Maier-Reimer and H. Meier-Fritsch: An explicit numerical model to simulate upwelling events. *Rapp. P.-V. Reün. Cons. Int. Explor. Mer.* 180, 83–92 (1982).

De Elvira, A.R. and P. Lemke: A Langevin equation for stochastic climate models with periodic feedback and forcing variance. *Tellus* 34, 313–320 (1982).

Fenton, J.D.: On the numerical solution of convective equations. *Bull. Austral. Math. Soc.* 26, 81–105 (1982).

Hasselmann, K.: An ocean model for climate variability studies. *Prog. Oceanogr.* 11, 69–92 (1982).

Herterich, K. and K. Hasselmann: The horizontal diffusion of tracers by surface waves. *J. Phys. Ocean.* 12, 704–711 (1982).

Janopaul, M.M., P. Broche, J.C. de Maistre, H.H. Essen, C. Blanche, G. Grau and E. Mittelstaedt: Comparison of measurements of sea currents by HF radar and by conventional means. *Int. J. Remote Sensing* 3, 409–422 (1982).

Maier-Reimer, E., D. Müller, D. Olbers, J. Willebrand u. K. Hasselmann: Ein Modell der ozeanischen Zirkulation zur Untersuchung von Klimaschwankungen. *Umweltforschungsplan des BMI, Forschungsber.* 104 02 612 (1982).

Maier-Reimer, E. and J. Sündermann: On tracer methods in computational hydrodynamics. In: *Engineering Applications of Computational Hydroautics*, Vol. 1, Eds. M.B. Abbott, J.A. Cunge. Pitman Adv./Publ. Progr., Boston 1982, 198–217.

Olbers, D.J., J. Willebrand and M. Wenzel: The inference of ocean circulation parameters from climatological hydrographic data. *Ocean Modelling* 46, 5–9 (1982).

Schuler, D.L., W.J. Plant, W.P. Eng, W. Alpers and F. Schlude: Dual-frequency microwave backscatter from the ocean at low grazing angles: Comparison with theory. *Int. J. Remote Sensing* 3, 363–371 (1982).

SWAMP Group: Sea Wave Modeling Project (SWAMP), Part 2: A Compilation of Results. KNMI publ. 161, 169 S. (1982).

Welander, P.: The determination of the geostrophic velocity normal to a closed hydrographic section. *Ocean Modelling* 46, 1–3 (1982).

– A simple heat-salt oscillator. *Dyn. Ocean Atm.* 6, 233–242 (1982).

Diplomarbeit

Witte, H.: Messung der Dispersion von Driftbojen in der Nordsee zur Bestimmung des Einflusses des Seegangs auf die Diffusion. Hamburg 1982.

Physik der Atmosphäre (H. Hinzpeter)

Arbeitsgebiete

Wechselwirkung Strahlung-Atmosphäre, insbesondere der Einfluß von Wolken und Spurenstoffen (wie Kohlendioxid und Aerosolteilchen). Konvektion und turbulente Felder in der unteren Troposphäre. Fernerkundungsverfahren zur Bestimmung meteorologischer Zustandsgrößen in der Grenzschicht.

Ergebnisse

Ausbreitung von Schadstoffen im Küstenbereich. Im Küstenbereich ist das Verständnis der speziellen Ausbreitungsvorgänge beim Übergang zwischen Land und See von besonderer Bedeutung. Experimentelle Untersuchungen der wesentlichen Grenzschichtstrukturen wurden an der Nordseeküste im Rahmen des Küstenexperiments PUKK (Projekt zur Untersuchung des Küstenklimas) mit Hilfe von Doppler-SODAR- und LIDAR-Systemen im Herbst 1981 durchgeführt. Im Mai 1982 wurden mit diesen indirekten Meßverfahren auf dem Forschungsschiff GAUSS des Deutschen Hydrographischen Instituts im Verbrennungsgebiet der Nordsee Vermessungen der Abgasfahnen der Verbrennungsschiffe vorgenommen. Diese Messungen dienen der Verifikation eines numerischen Ausbreitungsmodells, das die räumlich-

zeitlichen Variationen des Wind-, Temperatur- und Turbulenzfelds sowie deren Einfluß auf die Ausbreitungsvorgänge berücksichtigt.

Parallel zu diesen Untersuchungen wird ein dreidimensionales meteorologisches Feldmodell entwickelt, mit dem die für den Küstenbereich charakteristischen Grenzschichtstrukturen, wie interne Grenzflächen und Zirkulationszellen für unterschiedliche Bedingungen, simuliert werden können. Die Teilnahme mit einem Doppler-SODAR-System an dem internationalen Küstenexperiment COAST (Cooperative Operations with Acoustic Sounding Techniques) an der holländischen Nordseeküste im März bis Mai 1983 soll im wesentlichen der Untersuchung dieser küstenspezifischen Strukturen zur Eichung und Verifikation des Feldmodells dienen (Wamser, Hotzler, Lagrange).

Klimabeeinflussung durch anthropogenes Aerosol. Einer der wesentlichen Klimafaktoren des Systems Erde-Atmosphäre ist die planetare Albedo (das Verhältnis von eingestrahelter zu reflektierter solarer Energie), denn sie bestimmt zusammen mit der thermischen Strahlungsbilanz Erwärmung oder Abkühlung der Atmosphäre. Neben Spurengasen, wie Kohlendioxid, beeinflussen besonders Aerosole die planetare Albedo, vor allem wegen ihrer Wirkung auf die Mikrophysik der Wolken. Die direkt als Teilchen in die Atmosphäre emittierten oder aus Gas-Teilchen-Umwandlungen in der Atmosphäre gebildeten Aerosolteilchen breiten sich regional wie global aus. Ihre Wirkung auf das Klima hängt wesentlich von Konzentration, Vertikalverteilung, Größenverteilung, Hygroskopizität und vom komplexen Brechungsindex der Teilchen selbst sowie von deren Einfluß auf die optischen Eigenschaften der Wolken ab.

Um die möglichen Wirkungen vermehrter Aerosol- und Schwefeldioxid-Emissionen auf das globale Klima abschätzen zu können, muß erstens die räumliche Verteilung der Aerosole in der Troposphäre berechnet und zweitens die Auswirkung auf die

planetare Albedo durch Strahlungstransportrechnungen bestimmt werden (Grassl, Newiger).

Um die globale Aerosolverteilung zu berechnen, wurde ein zweidimensionales, höhen- und breitenabhängiges Gitterpunktmodell entwickelt. Die Reduktion auf zwei Dimensionen ist für die Beschreibung des Problems gerechtfertigt, da die zonale Ausbreitung im Mittel verhältnismäßig schnell erfolgt. In mittleren nördlichen geographischen Breiten wurde eine Gitterfeineinteilung vorgenommen, da hier über 90% des anthropogenen Anteils der Aerosole emittiert werden. Die Bewegungs- und Bewölkungsfelder dieses Modells werden nach klimatologischen Mittelwerten vorgegeben und sind zeitlich konstant für die Berechnung einer stationären Aerosolverteilung in einer Jahreszeit. Zum Test des Gitterpunktmodells wurde die breitenabhängige Niederschlagsverteilung aufgrund von klimatologischen Verdunstungswerten am Boden berechnet. Es zeigte sich gute Übereinstimmung mit den beobachteten Werten.

Um Senkenprozesse für Aerosole besser parameterisieren zu können, wird eine Unterteilung in drei Größenklassen vorgenommen. Die Grenzen dieser Größenbereiche liegen bei $r \leq 0,1\mu\text{m}$ (Bereich der Aitkenteilchen), $0,1 < r \leq 1,0\mu\text{m}$ (Bereich der großen Teilchen) und $r > 1,0\mu\text{m}$ (Bereich der Riesenteilchen) und sind durch die typischen Minima in den Verteilungsfunktionen der Anzahl, der Oberfläche und des Volumens der Teilchen gerechtfertigt. Im vorliegenden Modell sind die Quellen die natürlichen Aerosolemissionen (kontinental und maritim) sowie die Emission der anthropogenen Aerosole und des Schwefeldioxids. Die Umwandlung des SO_2 in Teilchen (Gas-Teilchen-Umwandlung) wird berücksichtigt und bildet eine sekundäre Teilchenquelle, die sich nicht in Bodennähe befindet. Auf die Teilchen wirken folgende Senkenprozesse: Sedimentation, Trockenablagerung aufgrund turbulenter Bewegungen in der bodennahen Schicht, Washout, d.h. Entfernung der Aerosolteil-

chen durch fallende Niederschlagstropfen in und unterhalb der Wolke, sowie Rain-out, d.h. Verwendung von Aerosolteilchen als Kondensationskeime in der Wolke. Innerhalb der Größenklassen kommt es zu Wanderungen von Teilchen durch Koagulation und durch Änderung der relativen Feuchte.

Bei klimatologisch vorgegebener Bedekung und Vertikalverteilung von Wolken werden dann mit einem vorhandenen Strahlungstransportmodell die Erwärmungs- und Abkühlungsraten und die Albedo des Systems Erde-Atmosphäre in Abhängigkeit von der geographischen Breite bestimmt. Das durch anthropogene Quellen erhöhte Angebot an Kondensationskeimen führt zu einer Änderung der optischen Dicke, also der Absorptions- und Rückstreuungseigenschaften von Wolken, was sich in Reinluft und in verschmutzten Gebieten unterschiedlich auf die Strahlungsbilanz auswirkt. Eine von Grassl (1978) angegebene Abschätzung liefert für einen Aerosolteilchenzuwachs von 10% eine Zunahme der optischen Dicke von Wolken um 2,6%, unabhängig von der Teilchenanzahl. Diese Abschätzung wurde wesentlich verbessert durch die Berücksichtigung der Reduktion der Übersättigung in der Wolke bei wachsender Aerosolteilchenanzahl. Mit dieser Rückkopplung erhält man für dieselbe prozentuale Änderung der Aerosolteilchenanzahl einer maritimen Wolke (300 Teilchen pro cm^3) eine prozentuale Änderung der optischen Dicke von Wolken um 1,1% und von 0,6% für kontinentale Gebiete (3000 Teilchen pro cm^3). 30 zusätzliche Teilchen in einer maritimen Umgebung beeinflussen die optische Dicke also stärker als 300 zusätzliche Teilchen in einem kontinentalen Gebiet (Newiger, Rehkopf, Levkov).

Veröffentlichungen

Augstein, E.: Lower boundary conditions and large scale flow during open cell convection over

the North Sea. In: KonTur Convection and Turbulence Experiment. Preliminary Scientific Results. Hmb. Geophys. Einzelschr. 57, Wittenborn Söhne, Hamburg 1982, 45–50.

Bakan, S.: Open cellular structures during KonTur. In: KonTur Convection and Turbulence Experiment. Preliminary Scientific Results. Hmb. Geophys. Einzelschr. 57, Wittenborn Söhne, Hamburg 1982, 51–62.

– Radiative influence on small scale convection within stratus cloud layers. In: Adv. in Earth and Plan. Sci., Vol. Cloud Dynamics. Reidel Publ., Dordrecht 1982, 43–56.

Brümmer, B., H. Schlünzen and W. Bögel: Cloud streets during KonTur. In: KonTur Convection and Turbulence Experiment. Preliminary Scientific Results. Hmb. Geophys. Einzelschr. 57, Wittenborn Söhne, Hamburg 1982, 63–78.

Grassl, H. and M. Newiger: Changes of local planetary albedo by aerosol particles. In: Studies in Environmental Science 20, Vol. Atmospheric Pollution 1982. Elsevier Sci. Publ., Amsterdam 1982, 313–320.

Hoerber, H. C. (Ed.): KonTur Convection and Turbulence Experiment. Field phase report. Hmb. Geophys. Einzelschr. 1, Reihe B, Wittenborn Söhne, Hamburg 1982.

Schmetz, S., E. Raschke and H. Fimpel: Aircraft measurements of thermal radiation in the clear atmosphere. In: KonTur Convection and Turbulence Experiment. Preliminary Scientific Results. Hmb. Geophys. Einzelschr. 57, Wittenborn Söhne, Hamburg 1982, 101–112.

Timmermann, H. u. G. Peters: Messung von Temperaturprofilen in der atmosphärischen Grenzschicht mit einem Radio-Akustischen Sondierungssystem (RASS). Kleinheubacher Ber. 25, 217–222 (1982).

Dissertation

Bakan, S.: Strahlungsgetriebene Zellularkonvektion in Schichtwolken. Hamburg 1981.

Anschrift des Instituts

Bundesstr. 55, 2000 Hamburg 13
Tel. 040/41141