

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 (Graßl) untersucht vorwiegend Prozesse der Atmosphäre, insbesondere in der unteren Grenzschicht.

Geschäftsführender Direktor:

Prof. Dr. Klaus Hasselmann

Kollegium, Wissenschaftliche Mitglieder:

Prof. Dr. Hartmut Graßl

Prof. Dr. Klaus Hasselmann

Em. Wissenschaftliches Mitglied:

Prof. Dr. Hans G. T. Hinzpeter (seit 1.2.1989 emeritiert)

43 Mitarbeiter, davon 17 Wissenschaftler; 28 Drittmittelbeschäftigte, davon 25 Wissenschaftler, 10 wissenschaftliche Gäste und Stipendiaten.

Physik des Meeres und Klimadynamik (K. Hasselmann)

Arbeitsgebiete

Veränderlichkeit und Vorhersagbarkeit des Klimas, Klimamodelle, Wechselwirkungen Atmosphäre-Ozean-Eis-Biosphäre. Entwicklung und Anwendung statistischer Methoden zur Erkennung von Klimaänderungen. Assimilation von Satellitendaten in Klimamodelle. Seegang.

Ergebnisse

Der Meeresspiegelanstieg als Folge einer anthropogen bedingten Aufheizung der Erdat-

mosphäre. Im Mittelpunkt der öffentlichen Diskussion um anthropogene (durch den Menschen verursachte) Klimaänderungen steht der zusätzliche Treibhauseffekt der Erdatmosphäre als Folge der Emission bestimmter Spurengase, insbesondere des Kohlendioxids (CO₂). Bei Fortsetzung des bisherigen Trends der CO₂-Emissionen sagen Modellrechnungen eine globale Erwärmung um 2–4 °C in den nächsten 50 bis 200 Jahren voraus. Als Folge der globalen Erwärmung ist ein globaler Anstieg des Meeresspiegels in den kommenden Jahrzehnten zu erwarten.

Drei Faktoren bestimmen im wesentlichen das Ausmaß und die regionale Struktur des Meeresspiegelanstiegs: 1.) die thermische Expansion des Meerwassers, 2.) mögliche Änderungen in der Ozeanzirkulation und 3.) das mögliche Abschmelzen der arktischen und antarktischen Eisschilde. In den bisherigen Arbeiten zum Meeresspiegelanstieg ist jedoch die Ozeandynamik gar nicht oder nur sehr vereinfacht berücksichtigt worden. Daher wurde das am Institut entwickelte großskalig geostrophische ozeanische Zirkulationsmodell (LSG) dazu verwendet, die Änderung des Meeresspiegels infolge einer Erwärmung der Erdatmosphäre zu simulieren.

Das LSG-Modell enthält alle großskaligen, für Klimazeitskalen relevanten Bewegungsformen, während die kleinskaligen Bewegungsformen herausgefiltert sind. Dies wurde durch Approximationen der ozeanischen Bewegungsgleichungen in der Weise erreicht, daß das Strömungsfeld sich sofort auf die Massenverteilung und den Windschub einstellt. Änderungen der Zirkulation werden so allein durch die langsame Entwicklung des Massenaufbaus bestimmt, die aus der Advektion von Wärme, Salz und Eis sowie dem Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre resultiert. Durch die spezielle, den klimavarian-

ten Raum- und Zeitskalen angepaßte Formulierung ist das LSG-Modell im Rechenzeitverbrauch herkömmlichen Modellen deutlich überlegen und kann daher ohne Schwierigkeiten zur Simulation vieler Jahrtausende verwendet werden.

In dem hier beschriebenen Experiment wurde das LSG-Modell zusätzlich zur Klimatologie mit monatlichen Anomalien der Lufttemperatur angetrieben, wie sie von vier atmosphärischen Zirkulationsmodellen verschiedener Institute [Goddard Institute for Space Studies (GISS), Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), Oregon State University (OSU) und United Kingdom Meteorological Office (UKMO)] im Falle einer Verdopplung der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration berechnet wurden. Alle vier Anomalienmuster zeigen eine ähnliche räumliche Struktur mit einer polwärtigen Zunahme der Temperaturanomalien infolge der Eis-Albedo-Rückkopplung. Für den Einsatz als Antrieb für das LSG-Modell wurden

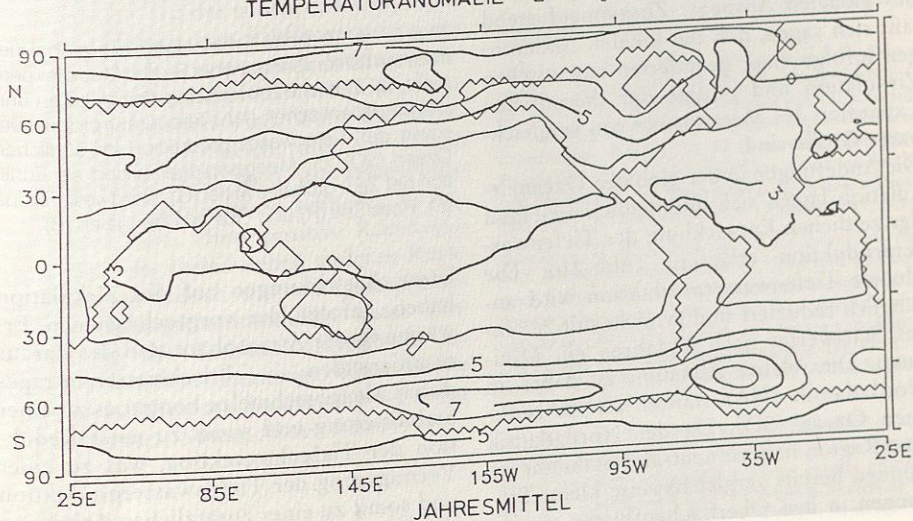
die Anomalienmuster gemittelt (Abb.1). Die Anomalien sind überall positiv mit einer mittleren Erwärmung über den Ozeanen von etwa 4°C .

Es wurde angenommen, daß das Anomalienmuster zeitlich invariant ist, sich seine Amplitude jedoch allmählich entsprechend einer Exponentialfunktion mit einer Zeitkonstante von 40 Jahren entwickelt. Das Experiment hat eine Gesamtdauer von 2000 Jahren. Die zeitliche Entwicklung der mittleren Temperaturänderung über den Ozeanen während des Experiments ist in Abb.2a für die ersten 50 Jahre gezeigt. Am Ende dieser Periode erreicht die angenommene Temperaturänderung einen Wert von $2,9^{\circ}\text{C}$. Die Rückkopplung der Atmosphäre auf die ozeanische Zirkulation durch Veränderungen im Windstreß und im Frischwasserfluß sind in der Rechnung nicht berücksichtigt worden.

Die Vernachlässigung der atmosphärischen Rückkopplung, die Annahme zeitvarianter Anomalienmuster der oberflächennahen Lufttemperatur sowie die Nichtberücksichtigung der großen Eisschilde stellen sicherlich wesentliche Idealisierungen dar. Das hier beschriebene Experiment kann daher nur als Test für die Sensitivität der ozeanischen Zirkulation gegenüber einer vorgeschriebenen atmosphärischen Er-

Abb. 1: Mittleres Anomalienmuster der Lufttemperatur (gemittelt über 4 Modellsimulationen mit atmosphärischen Zirkulationsmodellen), das als Antrieb für das ozeanische Modell (LSS) verwendet wurde. Der globale Mittelwert der Temperaturanomalie über See beträgt 4°C .

TEMPERATURANOMALIE $2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$



wärmung angesehen werden, nicht jedoch als eine Vorhersage.

Die zeitliche Entwicklung des global gemittelten Wasserstands (G) (Abb. 2 c) zeigt im Jahr 50 einen Anstieg von 19 cm, der im wesentlichen durch Änderungen oberhalb der Hauptsprungschicht verursacht wird. Am Ende der Simulation nach 2000 Jahren beträgt der Anstieg des global gemittelten Wasserstandes 51 cm. Während im Jahr 50 die vorgeschriebene atmosphärische Temperatur bereits 72% ihres Gleichgewichtswertes erreicht hat (Abb. 2 a), beträgt der Anstieg des Wasserstands zu diesem Zeitpunkt erst 38% seines Gleichgewichtswertes. Nach 80 Jahren hat der Wasserstand 50% und nach 210 Jahren 75% des Gleichgewichtsanstieges erreicht. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit der langen Zeitskalen bei der Anpassung der globalen Ozeanzirkulation auf eine Erwärmung der Atmosphäre.

Regional unterscheiden sich die Anstiege im Meeresspiegel nach 50 Jahren Simulationszeit recht deutlich (Abb. 2 c). Der Anstieg des Meeresspiegels in Nordwest Europa (E) ist mit 35 cm etwa doppelt so groß verglichen mit dem globalen Anstieg (G), während der Anstieg in der Ross See (R) deutlich geringer als im globalen Mittel ausfällt. Der Anstieg des Meeresspiegels im Golf von Bengalen (B) liegt mit etwa 13 cm etwa in der Größenordnung des globalen Anstiegs. Zusammenfassend lässt sich sagen, daß die lokalen Änderungen infolge einer geänderten ozeanischen Zirkulation und infolge der thermischen Expansion des Meerwassers von vergleichbarer Größe sind.

Die Änderungen in der globalen Ozeanzirkulation lassen sich anschaulich an Hand der zeitlichen Entwicklung der Tiefenwasserproduktion erläutern (Abb. 2 b). Die globale Tiefenwasserproduktion wird anfänglich reduziert und erreicht mit 2/3 ihres Startwertes nach 40 Jahren ein Minimum. Die relative Abnahme ist dabei im Nordatlantik (NA) stärker als im südlichen Ozean (SO). Da der Nordatlantik eine Region nahezu neutraler Stabilität ist, können bereits vergleichsweise kleine Störungen in den Oberflächenflüssen signifi-

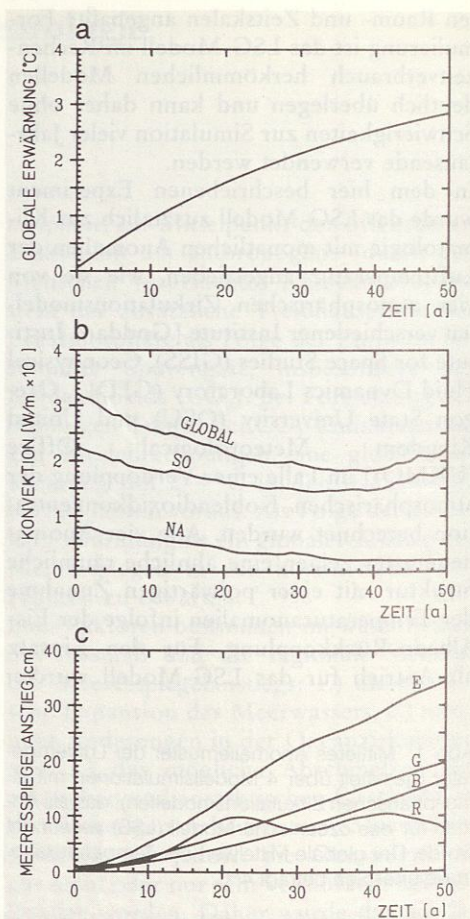


Abb. 2: a): Zeitliche Entwicklung der global gemittelten Lufttemperatur über See im Modellexperiment. b): Zeitliche Entwicklung der globalen und der nordatlantischen (NA) Temperaturproduktion, sowie der Tiefenwasserproduktion im südlichen Ozean (SO). c): Meeresspiegelanstieg als Funktion der Zeit: globales Mittel (G), Nordwest Europa (E), Ross See (R) und Golf von Bengalen (B).

kante Auswirkungen auf die Zirkulation haben. Infolge der vorgeschriebenen Erwärmung der Atmosphäre und des daraus resultierenden Frischwassereintrages durch Meereisschmelze kommt es zu einer Stabilisierung und somit zu einer Reduktion der Tiefenkonvektion, was zu einer Verringerung der Tiefenwasserproduktion und somit zu einer zusätzlichen Anhebung des Meeresspiegels führt. Eine zweite Re-

gion relativ hohen Wasserstandes wurde in der Region des Antarktischen Zirkumpolarstroms (ACC) gefunden (nicht gezeigt), der sich unter Intensivierung nach Süden verlagerte.

Die gefundenen Ergebnisse sind konsistent mit den bisherigen Arbeiten, die den Effekt der thermischen Expansion des Meerwassers infolge einer globalen Erwärmung untersucht haben. Außerdem sind die gefundenen Zirkulationsänderungen denen in gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodellen simulierten recht ähnlich, obwohl in diesen Studien die Änderungen im Meeresspiegel nicht diskutiert worden sind.

Die wenigen Beobachtungsdaten sind ebenfalls konsistent mit den hier beschriebenen Ergebnissen. Die Reduktion der nordatlantischen Tiefenwasserproduktion führt infolge der Isolierung der oberen Ozeanschichten in dieser Region zu einer Abkühlung. Beobachtungsdaten aus dem Nordatlantik zeigen interessanterweise ebenfalls einen Abkühlungstrend während der letzten 20 Jahre, obwohl die hemisphärische Mitteltemperatur während dieser Zeit angestiegen ist.

Die Reduktion der globalen Tiefenwasserproduktion hat möglicherweise auch einen starken Einfluß auf die atmosphärische CO₂-Konzentration. Zur Zeit wird ein beträchtlicher Teil des emittierten CO₂ durch die Neubildung von Tiefenwasser in den tiefen Ozean transportiert, wodurch der Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration limitiert wird. Wenn die Effektivität der CO₂-Speicherung im Ozean herabgesetzt wird, wird die atmosphärische CO₂-Konzentration schneller als bisher anwachsen. Diese positive Rückkopplung kann im Detail neben anderen Rückkopplungen jedoch nur mit gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodellen unter Einbeziehung des Kohlenstoffkreislaufs berechnet werden. Derartige Experimente werden zur Zeit am Institut durchgeführt (Mikolajewicz, Santer, Maier-Reimer).

Veröffentlichungen

- Barnett, T. P., L. Dümenil, U. Schlese, E. Roeckner und M. Latif: The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations. *J. Atmos. Sci.* **46**, 661–685 (1989).
- Böhmer, W. J. u. K. Herterich: Ein gekoppeltes Inland-Schelfeis Modell. *Annal. Meteorol.* **26**, 124–125 (1989).
- Cubasch, U.: A Global Coupled Atmosphere-Ocean Model. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **329**, 263–273 (1989).
- Coupling a Global Atmosphere Model with a Global Ocean Model using the Flux Correction Method. In: *Aspects of Coupling Atmosphere and Ocean Models*, Ed. R. Sausen. *Met. Inst. Univ., Hamburg*, Report No. 6, 1989, 39–60.
- Hasselmann, K.: Das Klimaproblem – eine Herausforderung der Forschung. In: *Wie die Zukunft Wurzeln schlug. Aus der Forschung der Bundesrepublik Deutschland*, Hrsg. R. Gerwin. Springer, Berlin 1989, 145–159.
- Heimann, M. and C. D. Keeling: A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 2. Model description and simulated tracer experiments. In: *Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas*, Ed. D. H. Peterson. *Geophysical Monograph* 55. AGU, Washington 1989, 237–275.
- Heimann, M., C. D. Keeling and C. J. Tucker: A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 3. Seasonal cycle and synoptic time scale variations. In: *Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas*, Ed. D. H. Peterson. *Geophysical Monograph* 55. AGU, Washington 1989, 277–303.
- Herterich, K.: Klimarelevante Prozesse in den polaren Breiten. *Ann. Meteorol.* **26**, 120–123 (1989).
- A three-dimensional ice-sheet model: Test case Antarctica. *Max-Planck-Institut für Meteorologie*, Report No. 25, 34 ff. (1989).
- Heinze, C.: Glacial pCO₂ reduction and the deep sea record – experiments with the Hamburg Carbon Cycle Model. In: *World Meteorological Organization. Environmental Pollution Monitoring and Research Programme. Report No. 59. Extended Abstracts of Papers Presented at the Third Int. Conf. on Analysis and Evaluation of Atmospheric CO₂ Data Present and Past*, Hinterzarten, 16–20 October 1989, 9–14.
- Keeling, C. D., R. B. Bacastow, A. F. Carter, S. C. Piper, T. P. Whorf, M. Heimann, W. G. Mook and H. Roeloffzen: A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 1. Analysis of observational data. In: *Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas*, Ed. D. H. Peterson. *Geophysical Monograph* 55. AGU, Washington 1989, 165–236.
- Keeling, C. D., S. C. Piper and M. Heimann: A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 4. Mean annual gradients and interannual variations. In: *Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas*, Ed.

D.H. Peterson. Geophysical Monograph 55. AGU, Washington 1989, 305-363.

Kiladis, G., H.v. Storch and H.van Loon: On the origin of the South Pacific Convergence Zone. *J. Climate* 2, 1185-1195 (1989).

Kuhle, M., K. Herterich and R. Calov: On the ice age glaciation of the Tibetan highlands and its transformation into a 3-d model. *Geo J.*, 201-206 (Febr. 1989).

Latif, M. and R.A. Madden: Simulation of the 30-60 day wave in the equatorial Pacific. In: *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, Ed. G.J. Boer. WMO/TD-No. 332, 8.32-8.33 (1989).

Lautenschlager, M. and K. Herterich: Atmospheric Response to Ice-Age Conditions - Climatology near the Earth's Surface. Max-Planck-Institut für Meteorologie, MPI Report No. 38, 1989, 18 S.

- Climatic Response to Ice-Age Conditions. Part 1: The Atmospheric Circulation. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 42, 36 S. (1989).

Lautenschlager, M. and U. Schlese: Atmospheric Response to Ice-Age Conditions - Climatology near the Earth's surface. In: *Climate Simulations with the ECMWF T21-model in Hamburg. Part III: Diagnosis and Response Experiments*, Ed. G. Fischer. Met. Institut, Large Scale Atmospheric Modelling, Report No. 7, 233-247 (1989).

Lemke, P.: Results from sea ice-ocean modeling experiments in the Weddell Sea WMO/TD-No. 272 (WCR-18), B1-B13 (1988).

- Modellierung des Meereises und der ozeanischen Deckschicht im Weddellmeer. *Promet*, H. 1/2, 28-33 (1989).

- Sea ice - mixed layer - pycnocline interaction in the Weddell Sea. In: *Proc. of the 16th Stanstead Seminar Highlatitude climate processes with special emphasis on large scale air-ice-ocean interaction*, Ed. L. Mysah. CRG-Report No. 89-12, 83-89 (1989).

Loewe, P.: The ECMWF T21 Atmospheric GCM: A qualified-contender for a coupled-climate model including Sea ice dynamics. In: *Climate simulations with the ECMWF T21-model in Hamburg. Part III: Diagnosis of Response Experiments*, Ed. G. Fischer. Met. Institut, Large Scale Atmospheric Modelling, Report No. 7, 79-124 (June 1989).

Lukesch, U. and H.v. Storch: Simulation of interannual SST variability in the North Pacific. In: *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, Ed. G.J. Boer. WMO/TD-No. 332, 8.9-8.10 (1989).

Maier-Reimer, E.: On the effects of sediments on the airborne fraction. In: *World Meteorological Organization. Environmental Pollution Monitoring and Research Programme. Report No. 59. Extended Abstracts of Papers Presented at the Third Int. Conf. on Analysis and Evaluation of Atmospheric CO₂ Data Present and Past*, Hinterzarten, 16-20 October 1989, 17-220.

Maier-Reimer, E. and C. Heinze: Geochemical OGCM studies on natural and man made climate variability. In: *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, Ed. G.J. Boer. WMO/TD-No. 332, 8.15-8.17 (1989).

Maier-Reimer, E. and U. Mikolajewicz: Experiments with an OGCM on the Cause of the Younger Dryas, Eds. A. Ayala-Castañes, W. Wooster and A. Yáñez-Arancibia. UNAM Press, México D.F. 1988, 87-100.

Monfray, P., M. Heimann and E. Maier-Reimer: Uptake of anthropogenic CO₂ by ocean models calibrated or tested by bomb radiocarbon: Sensitivity to uncertainties in gas exchange formulation and ¹⁴C data. In: *World Meteorological Organization. Environmental Pollution Monitoring and Research Programme. Report No. 59. Extended Abstracts of Papers Presented at the Third Int. Conf. on Analysis and Evaluation of Atmospheric CO₂ Data Present and Past*, Hinterzarten, 16-20 October 1989, 215-216.

Sausen, R. and U. Cubasch: A Technical guide for the Flux Correction Method. In: *Aspects of Coupling Atmospheric and Ocean Models*, Ed. R. Sausen, Report 6. Met. Inst. Univ. Hamburg 1989, 71 S.

Sterl, A. and M. Latif: ENSO studies using a coupled ocean-atmosphere GCM. In: *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, Ed. G.J. Boer. WMO/TD-No. 332, 8.3-8.4 (1989).

Storch, H.v. and D. Baumhufner: An index of the tropical 30-60 day wave and its prediction. In: *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, Ed. G. J. Boer. WMO/TD-No. 332, 6.38-41 (1989).

Storch, H.v., M. Latif and J. Biercamp: Simulation of the Southern Oscillation in an atmospheric GCM. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 329, 179-188 (1989).

Storch, H.v., U. Weese and J. S. Xu: Simultaneous analysis of space-time variability. In: *Principal Oscillation Patterns and Principal Interaction Patterns with applications to the Southern Oscillation*. Proc. 4 IMSC, 41-45. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 34, 93-97 (1989).

Storch, H.v. and F. Zwiers: Recurrence analysis of climate sensitivity experiments. In: *Proc. First WMO Conference on long range forecasting: the practical problems and future progress*, Sofia, 31.9.-3.10.1986, 283-291 (1989).

Stössel, A.: Sea ice simulation in the Southern Ocean including vertical boundary layer interactions. In: *NRSC Conference Report No. 3: Workshop Proceedings of Regional and Mesoscale Modeling of Ice Covered Oceans*, Solstrand, October 1989, 157-161.

Stössel, A., P. Lemke and W.B. Owens: Coupled sea ice - mixed layer simulations for the Southern Ocean. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 30, 56 S. (1989).

Villwock, A. and M. Latif: Sensitivity studies with a simplified coupled ocean-atmospheric model. In: *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, Ed. G.J. Boer. WMO/TD-No. 332, 8.7-8.8 (1989).

Wolff, J.-O. and D. J. Olbers: The dynamical balance of the Antarctic Circumpolar Current studied with an eddy resolving quasigeostrophic model. In: *Mesoscale/Synoptic Coherent Structures in Geophysical Turbulence*, Eds. J. C. J. Nihoul and B. M. Jamart. Elsevier, Amsterdam 1989, 435-458.

Xu, J. S. and H. v. Storch: Prediction of extremes of the Southern Oscillation with POP analysis. In: Proc. 4IMSC, Rotorua/Neuseeland 1989, 102-109.

Zwiers, F. W. and H. v. Storch: Regime dependent time series modelling of the Southern Oscillation. In: Proc. 4IMSC, Rotorua/Neuseeland 1989, 115-121 (1989).

Habilitation

Latif, M.: Modellierung des gekoppelten Systems-Ozean-Atmosphäre in den Tropen. Hamburg 1989.

Diplomarbeit

Villwock, A.: Wechselwirkung Ozean-Atmosphäre in einem vereinfachten gekoppelten Modell. Hamburg 1989.

Physik der Atmosphäre (H. G. T. Hinzpeter; seit 1.2.1989 H. Graßl)

Arbeitsgebiete

Fernerkundung der Atmosphäre und der Erdoberfläche sowohl am Boden als auch vom Satelliten aus; Wechselwirkung Strahlung-Atmosphäre, insbesondere der Einfluß der Wolken, der Aerosolteilchen sowie atmosphärischer Spurengase; turbulente und konvektive Felder in der unteren Troposphäre, insbesondere geordnete konvektive Phänomene (Wolkenstraßen und zelluläre Strukturen von Wolken).

Ergebnisse

Fernerkundung. Die am Institut entwickelten bodengebundenen Fernmeßverfahren zur Ableitung vertikal hochaufgelöster Profile des Windes, der Temperatur und der Feuchte wurden auf ihre Eignung zur Bestimmung weiterer wichtiger atmosphärischer Parameter untersucht.

Messung mit gepulsten Lasern. Das differenzielle Absorptionslidar wurde so verändert, daß zusätzlich oder alternativ zum Wasserdampfprofil in der Troposphäre Eis-

und Wasserwolken zu unterscheiden sind und für Eiswolken teilweise auch die Kristallform bestimmbar wird. Während für die Messungen der Wasserdampfverteilung die unterschiedliche Absorption des Lichtes bei den beiden ausgesandten Wellenlängen ausgenutzt wird, können die Polarisationsseigenschaften des rückgestreuten Signals für die Bestimmung des Aggregatzustandes der Wolken und der Kristallform benutzt werden.

Die Polarisation des ausgesandten Lichtes bleibt bei Rückstreuung an Wassertropfen erhalten, bei Eiskristallen jedoch nicht. Nach Modellrechnungen mit Einschluss von Mehrfachstreuung in Wolken wächst in einer Wasserwolke der Depolarisationsgrad mit der Eindringtiefe in die Wolke nur langsam an. Bei Eiswolken dagegen ist das Signal stets depolarisiert, und der Depolarisationsgrad hängt wesentlich von der Kristallform ab. Dies liegt vor allem daran, daß in Eiswolken der Mehrfachstreuanteil klein ist. Eine Ausrichtung der Kristalle stört allerdings die angesprochenen einfachen Zusammenhänge.

Messungen während des ersten Internationalen Cirrus Experimentes von Sylt aus konnten mit den Modellergebnissen weitgehend interpretiert werden. Mit Aggregatzustand und Kristallform sind die Strahlungseigenschaften der Wolken besser bestimmbar, also auch ihr Einfluß auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre (Bösenberg).

Das Potential, die Vertikalverteilung der Temperatur in der Troposphäre mit einem Lidar zu messen, wurde in einer theoretischen Studie erschlossen. Danach ist es mit gegenwärtigen Lidars nicht möglich, bei Nutzung der Temperaturabhängigkeit von Absorptionslinien des molekularen Sauerstoffs bei etwa 760 nm Wellenlänge mit der gewünschten Genauigkeit von < 1 K Temperatur zu messen. Dies gilt selbst bei einer idealen Laserlinie, denn das Spektrum des Laserlichtes wird in der Atmosphäre durch zwei Arten von Streuprozessen verändert. Aerosolpartikel bzw. Wolkenpartikel ändern das Laserspektrum nur unmerklich, die Luftmoleküle durch ihre starken Geschwindigkeitsunterschiede

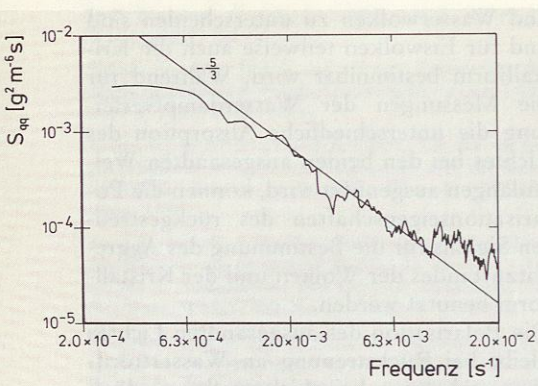


Abb. 3: Mit einem Zwei-Frequenz-Lidar fernerkundetes Varianzspektrum S_{qq} der Wasserdampfdichte in der planetarischen Grenzschicht in 247 m Höhe.

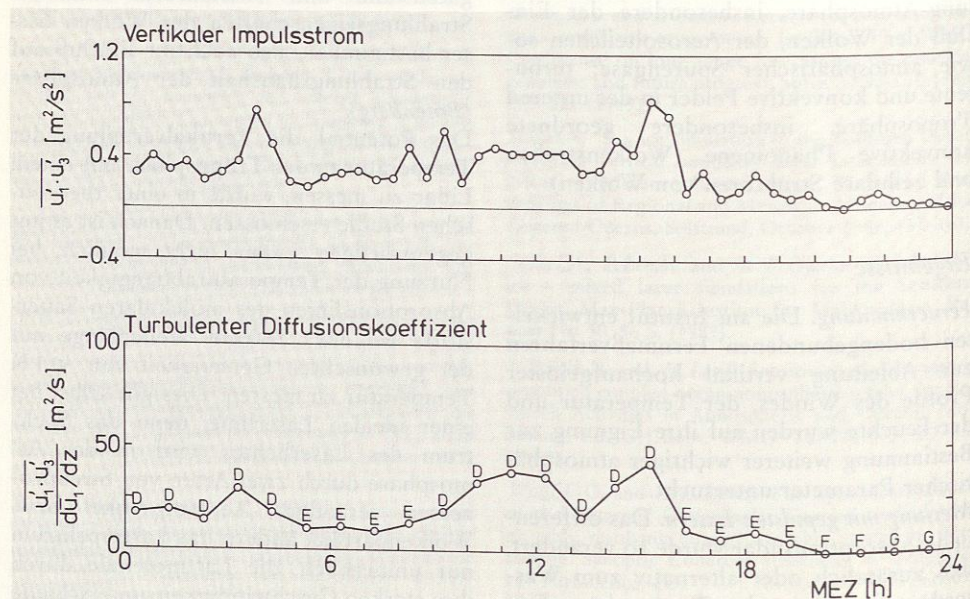
jedoch wesentlich. Die Vertikalverteilung und Beschaffenheit der streuenden Partikel können allein aus dem rückgestreuten Laserlicht jedoch nicht ausreichend genau erkannt werden (Bösenberg, Theopold).

Das Zweifrequenzlidar für die Messung der Verteilung des Wasserdampfes in der Troposphäre wurde soweit verbessert, daß bei Messungen in den unteren 2 Kilometern eine räumliche und zeitliche Auflösung von 75 m bzw. 25 s erreicht wurde.

Abb. 3 zeigt ein mit dem Lidar gemessenes Varianzspektrum der Wasserdampfdichte für eine mittlere Höhe von 247 m. Die Struktur des Spektrums entspricht der Erwartung, und aus dem Verlauf bei hohen Frequenzen kann man schließen, daß der statistische Fehler der Messung der Wasserdampfdichte kleiner als 0.1 g/m^3 (entsprechend 2%) ist. Dies ist offensichtlich ausreichend, um die turbulenten Prozesse bis zur maximal erreichbaren Frequenz von 0.02 Hz zu erfassen (Bösenberg, Thro).

Fernerkundung von Turbulenzparametern mit Radar. Für das Verständnis der Konvektion in der Atmosphäre benötigt man auch die turbulenten Flüsse des Impulses, der fühlbaren und der latenten Wärme. Diese Flüsse sind bisher kontinuierlich nur in Bodennähe oder stichprobenartig in größeren Höhen mit dem Flugzeug gemes-

Abb. 4: Zeitreihen turbulenter Größen, fernerkundet mit einem RASS in 200 m Höhe. Oben: Kovarianz der Windkomponente u_1 parallel zum mittleren Wind mit der Vertikalwindkomponente u_3 ; Mittelungsintervall 30 Minuten. Unten: Zugehöriger Diffusionskoeffizient $\left(\frac{u'_1 \cdot u'_3}{d u_1 / dz}\right)$. Die Buchstaben geben die Pasquill-Turnerschen Stabilitätsklassen an.



sen worden. Die Vertikalverteilung und der zeitliche Verlauf in größeren Höhen konnten dagegen nur aus einfach meßbaren Größen mit Hilfe grober Modellannahmen abgeschätzt werden.

Die am Institut aufgebauten Verfahren zur Messung der vertikalen Wind-, Temperatur- und Wasserdampfverteilung in der unteren Atmosphäre besitzen jedoch ein so hohes räumliches und zeitliches Auflösungsvermögen, daß auch turbulente Schwankungen in wichtigen Bereichen des Turbulenzspektrums zugänglich sind. Flüsse, ihre Divergenzen und turbulente Diffusionskoeffizienten sind so direkt und ohne einengende Annahmen bestimmbar geworden.

Das erste erfolgreiche Experiment zur Fernerkundung turbulenter Flüsse in der unteren Troposphäre betrifft den vertikalen Impulsfluß. Dabei wird die Kovarianz der vertikalen mit einer horizontalen Windkomponente aus den Varianzen von Windkomponenten parallel zu unterschiedlichen Strahlrichtungen eines Radars abgeleitet. Dieses Verfahren ist im Prinzip zwar lange bekannt, wurde wegen der begrenzten Genauigkeit jedoch bisher nur auf Episoden mit extrem großen Werten des Impulsflusses angewendet, oder es wurden Mittelwerte über viele Stunden gebildet, um signifikante Ergebnisse zu erzielen.

Statt eines Radars, das nur Rückstreuung durch Inhomogenitäten des Brechungsindex der Luft mißt, also anstelle eines Clear-Air-Radars, wurde ein erweitertes radioakustisches Sondierungssystem (RASS) benutzt, bei dem Schallgeschwindigkeitsprofile nicht nur entlang eines vertikalen Radarstrahls sondern auch entlang geschwenkter Radarstrahlen mit einer zeitlichen Auflösung von wenigen Sekunden gemessen werden können. Der Vorteil des RASS gegenüber dem Clear-Air-Radar ist, daß die Streuung an einer weitgehend deterministischen Struktur, nämlich dem periodischen künstlich erzeugten Schallwellengitter, anstatt an der turbulenten Brechungsindexstruktur stattfindet. Dadurch entfallen wesentliche Fehlerquellen bei der Bestimmung der Geschwindigkeit. Der

Nachteil ist, daß die Schallgeschwindigkeit nicht nur vom Wind sondern auch von der Temperatur beeinflusst wird. Man kann jedoch zeigen, daß der hierdurch bedingte Fehler der Impulsflußmessung meist unter 10% liegt.

In Abb. 4 (oben) ist der Tagesgang des vertikalen Impulsflusses der parallel zum mittleren Wind gerichteten Windkomponente sowie des entsprechenden turbulenten Diffusionskoeffizienten in 200 m Höhe dargestellt. Vergleichsmessungen mit einem anderen Verfahren waren nicht möglich. Daß die Werte in einer plausiblen Größenordnung liegen, zeigt die Zuordnung der Diffusionskoeffizienten nach einem von Draxler angegebenen Verfahren zu den Pasquill-Turnerschen Stabilitätsklassen „A“ bis „G“ (Abb. 4, unten). Danach liegen die Werte überwiegend im neutralen (D) bis stabilen Bereich (G), was mit der Jahreszeit (Februar) und Wetterlage zu vereinbaren ist. Ferner weisen bodennahe (10 m) Messungen des Impulsflusses mit einem Ultraschallanemometer einen ähnlichen Verlauf auf (hier nicht gezeigt) (Peters). Die Radarentwicklung erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Meteorologischen Institut der Universität Hamburg.

Veröffentlichungen

- Ansmann, A.: Bodengebundene DIAL-Wasserdampf-messung: Berücksichtigung der Dopplerverbreiterung der Laserlinie durch Rayleighrückstreuung. *Hamb. Geophys. Einzelschr.* 89, Ser. A, 69 S. (1989).
- Bakan, S.: Numerische Modellierung offener Zellularkonvektion in einem Kaltluftausbruch. *Ann. Meteorol.* 26, 189–191 (1989).
- Bakan, S. u. E. Schwarz: Bodenwärmeflüsse bei offener Zellularkonvektion. *Ann. Meteorol.* 26, 52–54 (1989).
- Becker, P.: Numerical investigation of organized cumulus convection: A case study. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report 26, 27 S. (1989).
- Bösenberg, J., A. Ansmann u. F. Theopold: Hochauflösende Feuchtemessungen mit einem Zweifrequenzlidar. *Ann. Meteorol.* 26, 27–58 (1989).
- Brümmer, B. (Ed.): ARKTIS '88, Field Phase Report. *Hamb. Geophys. Einzelschr.* 6, Ser. B, 282 S. (1989).
- Chlond, A.: Numerische und analytische Untersuchungen zum Einfluß einer diabatischen Erwärmung

auf die Ausbildung flacher Grenzschichtrollen. *Ann. Meteorol.* **26**, 218–219 (1989).

Doerffer, R., R. J. Fischer, M. Stössel, C. Brockmann and H. Graßl: Small scale patches of suspended matter and phytoplankton in the Elbe river estuary, German Bight and tidal flats. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, GKSS 89/E/25, 191–200 (1989).

Doerffer, R., H. Graßl, B. Kunkel and H. van der Piepen: ROSIS – an advanced imaging spectrometer for the monitoring of water colour and chlorophyll fluorescence. *SPIE* **1129**, 117–121 (1989).

Graßl, H.: Extraction of surface temperature from satellite data. In: Applications of Remote Sensing to Agrometeorology, ECSC, EEC, EAEC, Ed. F. Tozzelli. Brussels and Luxembourg 1989, 199–220.

– Anthropogene Beeinflussung des Klimas. *Phys. Bl.* **45**, 199–206 (1989).

– Was sagen uns Klimamodelle? In: P. Crutzen u. M. Müller, Das Ende des Blauen Planeten? Beck, München 1989, 49–64.

– Die doppelte Wirkung der Fluorchlorkohlenwasserstoffe: Ozonabbau und erhöhter Treibhauseffekt. *VDI-Berichte* **745**, 129–146 (1989).

Graßl, H., L. Levkov, D. P. Eppel and H. Weber: Dynamics of trace elements carried by atmospheric aerosols in precipitating mesoscale systems. *J. Aerosol Sci.* **20**, 1123–1126 (1989).

Hollweg, H.-D.: Line-by-Line model for the calculation of infrared radiation fluxes and cooling rates in clear sky atmospheres. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 36, 46 S. (1989).

König, T., G. Gesell, S. Bakan and P. Wendling: Satellite imagery of the Greenland Sea during the Experiment „Arktis 88“. DLR, Oberpfaffenhofen 1988, 76 S.

Kruspe, G.: Valdivia Fahrt Nr. 70, Arktis 88. In: Berichte über die Fahrten des Hamburger Forschungsschiffes Valdivia, 1988. Universität Hamburg, 53–108 (1989).

Levkov, L., D. Jacob, D. Eppel and H. Graßl: Test of a parameterization scheme for cloud microphysical processes in a 3-d mesoscale model. *Atm. Res.* **24**, 193–208 (1989).

Manschke, A.: Fernerkundung der Temperatur der Wolkenbasis in konvektiven Strömungen. *Ann. Meteorol.* **26**, 99–100 (1989).

Petersen, G., H. Weber and H. Graßl: Modelling the atmospheric transport of trace metals from Europe

to the North Sea and the Baltic Sea. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, GKSS 89/E/14, 57–81 (1989).

Sun, Y.-Y. and Z.-P. Li: Depolarization of polarized light caused by high altitude clouds. 2: Depolarization of lidar induced by water clouds. *Appl. Opt.* **28**, 3633–3638 (1989).

Sun, Y.-Y., Z.-P. Li and J. Bösenberg: Depolarization of polarized light caused by high altitude clouds. 1: Depolarization of lidar induced by cirrus. *Appl. Opt.* **28**, 3625–3632 (1989).

Dissertation

Pang, S.: The radio acoustic sounding system using FM-CW-Radar for probing the atmospheric boundary layer, a system analysis. Hamburg 1989.

Diplomarbeiten

Becker, K.: Konzeption einer allgemeinen selbstbeschreibenden Datenstruktur zur Normierung von Schnittstellen zwischen Rechnerprogrammen. Hamburg 1989.

Martin, T.: Untersuchungen eines Falles mesoskaliger Bänder unter konvektiven Bedingungen während KONTROL '85. Hamburg 1989.

Schulz, J.: Numerische Untersuchungen zum Einfluß einer internen Wärmequelle auf die Struktur konvektiver Strömungen. Hamburg 1989.

Weisheit-Jahja, G.: Bestimmung der Oberflächentemperatur der Nordsee aus NOAA-Daten bei durchbrochener Bewölkung. Hamburg 1989.

Anschrift

Max-Planck-Institut für Meteorologie
Bundesstraße 55
2000 Hamburg 13
Tel. 040/41 17 30
Telefax 040/41 17 32 98