

Anschriften

Geschäftsführender Direktor:
Seestraße 92
70174 Stuttgart
Tel. 07 11/209 53 19
Telefax 07 11/2 26 57 22

Institut für Physik
Heisenbergstraße 1
70569 Stuttgart
Tel. 07 11/68 90
Telefax 07 11/6 89 10 10

Institut für Werkstoffwissenschaft
Seestraße 92
70174 Stuttgart
Tel. 07 11/209 51
Telefax 07 11/2 26 57 22

Außenstellen
Pulvermetallurgisches Laboratorium
Heisenbergstraße 5
70569 Stuttgart
Tel. 07 11/6 86 10
Telefax 07 11/6 86 11 31

Laboratorium für Reinststoffanalytik
(seit 1.1.1995 geschlossen)
Bunsen-Kirchhoff-Straße 13
44139 Dortmund
Tel. 02 31/1 39 20
Telefax 02 31/1 39 21 20

Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg

Gegründet 1975 zur Erforschung der physikalischen Grundlagen des Klimas. Das Institut besteht aus drei unselbständigen Abteilungen. Eine Abteilung (Hasselmann) befaßt sich mit allgemeinen Fragen der Klimadynamik, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen im System Atmosphäre-Ozean-Eis; die zweite (Graßl) untersucht vorwiegend Prozesse in der Atmosphäre und beim Austausch Ozean-Atmosphäre mit Schwergewicht bei der Fernerkundung mit Satelliten; die dritte (Bengtsson) widmet sich überwiegend der verbesserten Modellierung der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre mit Schwerpunkten bei der Wechselwirkung Biosphäre-Atmosphäre und der Darstellung von Wolkenprozessen.

Geschäftsführender Direktor:
Prof. Dr. Klaus Hasselmann
Kollegium, Wissenschaftliche Mitglieder:
Prof. Dr. Lennart Bengtsson
Prof. Dr. Hartmut Graßl
Prof. Dr. Klaus Hasselmann
Gast: Prof. Dr. Reimar Lüst,
Em. Wissenschaftliches Mitglied des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik
Em. Wissenschaftliches Mitglied:
Prof. Dr. Hans G. T. Hinzpeter

49 Mitarbeiter, davon 17 Wissenschaftler, 63 Drittmittelbeschäftigte, davon 57 Wissenschaftler; dazu 36 wissenschaftliche Gäste und Stipendiaten.

Physik des Meeres und Klimadynamik (K. Hasselmann)

Arbeitsgebiete

Gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle, Wechselwirkungen Atmosphäre-Ozean-Eis-Biosphäre. Entwicklung und Anwen-

dung statistischer Methoden zur Erkennung von Klimaänderungen. Assimilation von Satellitendaten in Klimamodelle. See-gang.

Physik der Atmosphäre (H. Graßl)

Arbeitsgebiete

Fernerkundung der Atmosphäre und der Erdoberfläche, sowohl vom 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 wie Wolkenstraßen und zelluläre Wolkenstrukturen; globaler Aerosoltransport und Klimawirkung der Aerosolteilchen.

Aktueller Forschungsschwerpunkt

*Entwicklung von
Fernerkundungsverfahren zur
Untersuchung atmosphärischer Prozesse*

Für die Untersuchung klimarelevanter Prozesse in der Atmosphäre ist in vielen Fällen eine kontinuierliche Erfassung der räumlichen Verteilung meteorologischer Parameter über lange Zeiten erforderlich. Insbesondere die Erfassung der Vertikalstruktur mit herkömmlichen Verfahren wie Radiosonden oder Meßflugzeugen ist dabei oft nicht ausreichend, es wird daher in zunehmendem Maße Fernerkundung eingesetzt. Hierfür werden am MPI für Meteorologie bodengebundene Fernerkundungsverfahren für die Messung der vertikalen Verteilung der meteorologischen Grundgrößen Wind, Temperatur und Feuchte entwickelt. Diese

Entwicklung ist in den letzten Jahren so weit fortgeschritten, daß detaillierte Prozeßbeobachtungen in der unteren Troposphäre möglich sind. Für die Wind- und Temperaturmessungen werden kombinierte Radar- und akustische Verfahren eingesetzt, für die Feuchtemessung ein Laser-Meßverfahren, das auf der differentiellen Absorption von Wasserdampf im nahen infraroten Spektralbereich beruht.

Radar-Rass: In einer gemeinsamen Arbeitsgruppe mit dem Meteorologischen Institut der Universität sowie mit Unterstützung des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung am Forschungszentrum Karlsruhe wurde ein besonders leistungsfähiges, mobiles Radar-Rass (Rass = radio acoustic sounding system) entwickelt, das für operationellen Einsatz geeignet ist. Hiermit werden Echos von mikroturbulenten Schwankungen des atmosphärischen Brechungsindex (Clear-Air), von Hydrometeoren sowie von einem durch Schallwellen erzeugten Brechungsindex-Gitter empfangen. Entsprechend vielfältig sind die daraus ableitbaren meteorologischen Informationen. Eine Besonderheit des WTR (WTR = Wind-Temperatur-Radar) ist die Möglichkeit, das Rass-Signal nicht nur für Temperaturmessungen, sondern zusätzlich neben dem Clear-Air-Signal für Windmessungen zu verwenden. Auf diese Weise können Höhenbereiche erfaßt werden, in denen mit dem üblichen Clear-Air-Signal aufgrund unvermeidlicher Bodenechos keine zuverlässigen Windmessungen möglich sind. Dafür wird ausgenutzt, daß die Schallgeschwindigkeit nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Wind beeinflusst wird. Hierfür war die Konstruktion einer besonders aufwendigen Schallquelle erforderlich, deren Strahlrichtung synchron mit dem Radar geschwenkt und deren Position relativ zum Radar in Abhängigkeit vom Windprofil automatisch optimiert wird.

In Abbildung 1 ist ein Beispiel gezeigt, wie sich die Clear-Air- und Rass-Messungen des Windprofils ergänzen. In dem Zeit-Höhenschnitt sind Vektoren des (horizontalen) Windes mit einer zeitlichen Auflösung von 10 min und einer Höhenauflösung von

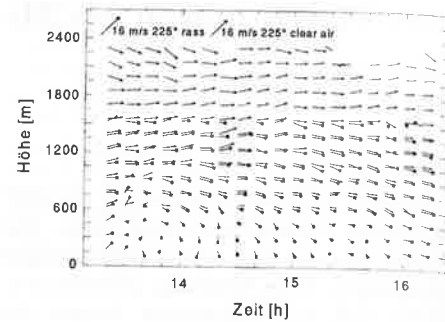


Abb. 1: Zeit-Höhenschnitt des horizontalen Windvektors, abgeleitet aus Clear-Air- und Rass-Signalen.

150 m dargestellt. Im Bereich unterhalb 600 m liefern nur Rass-Signale gültige Wind-Daten, da hier starke Festechos die Clear-Air-Signale verfälschten. Oberhalb 1500 m gibt es dagegen nur aus dem Clear-Air-Signal abgeleitete Messungen, da hier die Schallabsorption das Rass-Signal zu sehr abschwächt. Im Bereich zwischen 600 und 1500 m überlappen beide Meßverfahren, wodurch sich eine zuverlässige Kontrollmöglichkeit ergibt.

Unter günstigen Umständen konnten Meßhöhen bis zu 4000 m erreicht werden. Nach den Erfahrungen erster Feldmessungen im Jahre 1994 wird erwartet, daß kontinuierliche Windprofile in der unteren Troposphäre gewonnen werden können. Im Mittelpunkt des Interesses steht die Kombination mit den im folgenden beschriebenen Lasersystemen, um mit den jetzt verbesserten Möglichkeiten Transportvorgänge des Wasserdampfs und Ozons in der atmosphärischen Grenzschicht zu untersuchen.

Genaue Messungen der Wasserdampfverteilung mit dem Differential-Absorptions-Lidar stellen sehr hohe Anforderungen an das verwendete Lasersystem. Durch frühere experimentelle und theoretische Untersuchungen wurde von uns gezeigt, daß die spektralen Eigenschaften der verfügbaren Hochleistungslaser nicht ausreichen, um Messungen mit der erforderlichen Genauigkeit über lange Zeit durchzuführen. Deshalb wurde in der Arbeitsgruppe ein neues Lasersystem entwickelt, das sich durch sehr

Tab. 1: Geforderte und erreichte Lasereigenschaften für Wasserdampfmessungen bei besser als 5% Genauigkeit in der gesamten Troposphäre.

Parameter	Anforderung	Erreichter Wert
Wellenlängenbereich/nm	720-730	720-780
Laser-Linienbreite/cm ⁻¹	2 · 10 ⁻²	< 5 · 10 ⁻³
Wellenlängenstabilität/cm ⁻¹	± 7 · 10 ⁻³	2,1 · 10 ⁻³
Spektrale Reinheit	> 99%	> 99,99%
Pulslänge/ns	< 200	< 200
Strahldivergenz/mrad	< 1	≈ 0,4
Pulsenergie/mJ	> 50	> 50
Repetitionrate/Hz	> 10	> 15

gute Wellenlängenstabilität und spektrale Reinheit sowie geringe Linienbreite ausgezeichnet. Diese Eigenschaften bleiben ohne Nachjustierung über lange Zeit erhalten, durch weitgehende Verwendung von Festkörperlasern konnte eine hohe Zuverlässigkeit des Betriebes erreicht werden. Damit steht zum ersten Mal ein Lasersystem zur Verfügung, das alle Anforderungen für Wasserdampfmessungen in der Troposphäre ohne Einschränkungen erfüllt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Anforderungen und die erreichten Lasereigenschaften.

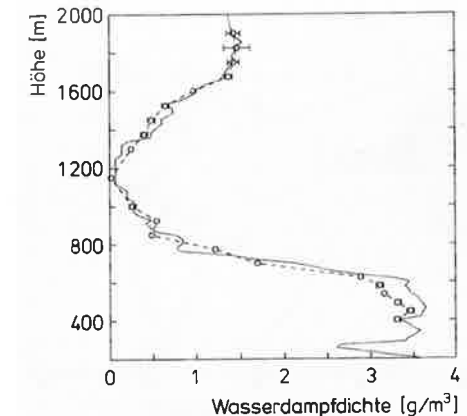
Die Genauigkeit der Wasserdampfmessungen mit diesem neuen System wurde in Testmessungen nachgewiesen, Abbildung 2 zeigt eine Vergleichsmessung mit einer Radiosonde, die üblicherweise für Vertikalsondierungen der Feuchte verwendet wird. Die Standardabweichung der Differenzen ist kleiner als 0,1 g/m³, alle Strukturen werden von beiden Geräten gleich wiedergegeben. Weitere Vergleichsmessungen brachten ähnlich gute Ergebnisse. Diese Übereinstimmung ist besser als erwartet, da die Genauigkeit von Radiosondenmessungen allgemein nicht sehr hoch eingeschätzt wird.

Es soll noch besonders hervorgehoben werden, daß mit dem Lidarsystem Messungen mit hoher zeitlicher (etwa 30 sec) und räumlicher (etwa 60 m) Auflösung in der unteren Troposphäre erfolgen können, wodurch insbesondere die Erfassung des tur-

bulenten Wasserdampftransportes ermöglicht wird. Nach Umrüstung des Lidarsystems für den Einsatz bei Feldexperimenten sollen deshalb die direkten Messungen des latenten Wärmeflusses wieder aufgenommen werden, die erstmals mit einer Kombination des alten Lidarsystems und einem Radar/Rass durchgeführt werden konnten.

Eine weitere wesentliche Komponente des Wasserkreislaufs ist der Niederschlag. Bis heute fehlen hierzu zuverlässige Messungen auf den Ozeanen, da herkömmliche Regensammler wegen der dort häufig großen

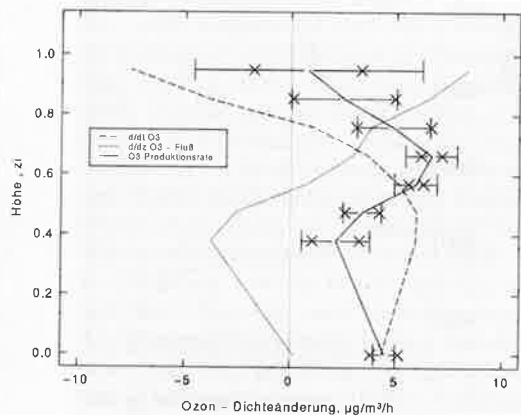
Abb. 2: Lidar- und Radiosondenmessung der absoluten Feuchte. Die Meßzeit betrug 15 min, die vertikale Auflösung 45-150 m.



Windgeschwindigkeiten so große Meßfehler aufweisen, daß sie nicht verwendet werden können. Aus diesem Grunde wurde **eine bereits vor 30 Jahren vorgeschlagene Methode** aufgegriffen, **Regenraten** aus den Dopplerspektren eines vertikal blickenden Radars abzuleiten. Mit dem vorhandenen Radar/Rass war es möglich, die noch offene Frage zu beantworten, welche Fehler durch die vertikale Windkomponente verursacht werden. **Diese Untersuchungen gaben den Anstoß für die industrielle Entwicklung eines sehr kompakten, operationellen Regenradars**, das anstelle von Regensammlern an windexponierten Orten eingesetzt werden kann. Dieses Meßverfahren liefert nicht nur die Regenraten, sondern auch Profile der Tropfenspektren bis in mehrere **hundert Meter Höhe**. Hierdurch ergeben sich **weitere nützliche Anwendungen, von der Kalibrierung der Z/R-Beziehungen operationeller Wetterradars bis zur Untersuchung von Fragen der Niederschlagsentstehung**.

Das von uns entwickelte Verfahren der direkten Flußmessung durch Kombination von Radar/Rass für die Vertikalwindmessung und Lidarverfahren für die Messung

Abb. 3: Gemessene Höhenprofile der zeitlichen Änderung der Ozonkonzentration, der vertikalen Ozon-Flußdivergenz und der daraus berechneten Ozonproduktionsrate. Für die Ozonproduktionsrate sind zufällige (H) und systematische (x) Fehler mit angegeben. Die Höhen sind auf die Grenzschichthöhe z_i normiert.



von Spurengaskonzentrationen wurde auch auf **Ozon ausgedehnt**, dessen Bedeutung in der **unteren Troposphäre** in zunehmendem Maße erkannt wird. Hierfür wurde ein Lidarsystem aufgebaut, das besonders für Messungen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung in der unteren Troposphäre bis etwa 3km Höhe optimiert wurde. Die Genauigkeit dieses Systems wurde in ausführlichen Vergleichen mit *In-situ*-Messungen am Fesselballon und mit freifliegenden Sonden nachgewiesen. Die kontinuierliche Messung der Vertikalverteilung der **Ozonkonzentration in Verbindung** mit der Vertikalwindmessung durch das Radar/Rass gestattet die **direkte Bestimmung** von zwei Termen der **Bilanzgleichung für Ozon**, nämlich der vertikalen Flußdivergenz und der zeitlichen Änderung der Konzentration. Damit kann die Summe aus Ozonproduktion und -advektion bestimmt werden. Bei homogener Verteilung kann man die Advektion vernachlässigen, so daß die Ozonproduktionsrate direkt bestimmt werden kann. Dies war mit konventionellen Messungen praktisch nicht möglich. Als **Beispiel** zeigt Abbildung 3 Höhenprofile **der beiden gemessenen Terme des Ozonbudgets, nämlich die zeitliche Änderung der Ozonkonzentration und die vertikale Flußdivergenz**, sowie die daraus hergeleitete Ozonproduktionsrate. Man erkennt **deutlich**, daß im Meßzeitraum (**mittags**) die **Ozonkonzentration in der oberen Grenzschicht stark abnimmt**, während sie in der Mitte stark zunimmt. Das Profil der Flußdivergenz zeigt, daß dies durch eine Umverteilung von oben nach unten bewirkt wird, die vom Vortag übriggebliebene ozonreiche Restschicht wird in die sich neu entwickelnde Grenzschicht eingemischt. **Die durch Transportprozesse bewirkten Änderungen sind in diesem Fall offensichtlich groß gegenüber den chemisch bedingten**, so daß für das Verständnis der ablaufenden luftchemischen Prozesse unbedingt erforderlich ist, die Transportprozesse abzutrennen. Mit den gezeigten kombinierten Lidar-Radar/Rass-Messungen ist das in vielen Fällen möglich. Dies zeigt sehr deutlich, daß durch den Einsatz von Fern-

erkundungsverfahren Prozeßuntersuchungen durchgeführt werden können, die mit konventionellen Methoden nicht oder nur mit sehr großem Aufwand möglich sind (*Bösenberg, Peters*).

Theoretische Klimamodellierung (L. Bengtsson)

Arbeitsgebiete

Fortentwicklung numerischer Klimamodelle durch verbesserte Parameterisierung und

höhere räumliche Auflösung; damit Abschätzung der Vorhersagbarkeit und der Variabilität des Klimas im Zeitbereich von Monaten bis zu hundert Jahren, insbesondere sollen die quasi-zweijährigen Schwingungen und das El Niño-Ereignis verstanden werden.

Anschrift

Bundesstraße 55
20146 Hamburg
Tel. 0 40/41 17 30
Telefax 0 40/41 17 32 98