

Prof. Dr. Clemens Simmer
Meteorologisches Institut der
Universität Bonn (MIUB)
Auf dem Hügel 20
D-53121 Bonn
Tel.: 0228-73-5181
FAX: 0228-73-5188
email: csimmer@uni-bonn.de

Dr. Susanne Crewell

Tel.: 0228-73-5779

email: screwell@uni-bonn.de

Vorhabensbeschreibung zum Thema:

4D Bewölkung der unteren Atmosphäre (4DWOLKEN): Beobachtung/Modellierung im Mikrowellenbereich und Assimilation in Atmosphärenmodelle

1. Ziele

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das beantragte Vorhaben ist Bestandteil des Verbundprojektes 4DWOLKEN. Das Hauptziel des Teilprojektes ist die konsistente Erfassung der zeitlichen und räumlichen Variabilität des Flüssigwassergehaltes von niedriger Bewölkung zusammen mit der Temperatur- und Feuchtestruktur der Grenzschicht und unteren Troposphäre. Dies erfolgt mit einem neuartigen, räumlich (1°) und zeitlich (1 s) hoch auflösenden Mikrowellenradiometer (MICCY) und wird unterstützt durch andere bodengebundene (Wolkenradar) und flugzeuggetragene (Partikelproben) Messungen der Wolkenmikrophysik. Diese Daten dienen als Eingangsdaten für die dreidimensionale Strahlungstransportmodellierung und zur Entwicklung von verbesserten Wolkenparametrisierungen. Durch die Angliederungen der Messungen an die Intensivphasen des EU-Projektes CLIWA-NET wird ein hierfür einmaliger Datensatz über die 4-dimensionale Struktur der bewölkten atmosphärischen Grenzschicht erstellt werden.

Ein spezielles Teilziel ist die Entwicklung und Anwendung eines Algorithmus zur Bestimmung der Flüssigwasseranteile von Wolken- und Niederschlagspartikeln aus den multispektralen, polarisierten Mikrowellenmessungen. Damit kann untersucht werden, wie häufig und mit welchem Anteil am Wassergehalt Niederschlagsteilchen in Wolken, die zu keinem Niederschlag am Boden führen, auftreten.

In einer Anwendungskomponente wird ein Verfahren entwickelt, Flüssigwassergehalte in Atmosphärenmodelle zu assimilieren. Die Verbesserung von Vorhersagen eines nichthydrostatischen Wettervorhersagemodells ($1\text{km} < \Delta x < 10\text{km}$) durch neue Strahlungsparametrisierungen und das angepasste Assimilationsschema wird untersucht. Dies ermöglicht es, die Auswirkungen auf den Energie- und Wasserkreislauf auf diesen Skalen zu untersuchen, einem weiteren Ziel des Teilvorhabens.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen (Förderprogramm)

Die vorgeschlagenen Arbeiten fallen in den Bereich der „*Verbesserung des Systemverständnisses der Atmosphäre*“ und zwar in Bezug auf den „*Vertikaltransport in der Troposphäre: Wechselwirkungen mit Energie- Wasser- und Spurenstoffkreisläufen*“. Die direkten Bezugspunkte sind dabei:

- Wechselwirkung zwischen Vertikaltransporten in der planetaren Grenzschicht sowie dem Impuls-, Energie- Wasser- und Stoffhaushalt
- Transportprozesse zwischen planetarer Grenzschicht und der freien Troposphäre unter besonderer Berücksichtigung von Wolkenbildung und Strahlungshaushalt

- Untersuchung der wolkenbedingten und großräumigen Konvektion als Träger des Vertikaltransportes bis in die obere Troposphäre

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

a) Wissenschaftliche Ziele

- Beschreibung der zeitlichen und räumlichen Variabilität von Wolken
Durch den Einsatz eines neuartigen Mikrowellenspektrometers koordiniert mit einem 95 GHz Radar (Projektpartner GKSS) werden Messungen des Wolkenwassergehalts mit hoher Auflösung (Integrationszeiten 1s, Antennenöffnungswinkel $< 1^\circ$) gewonnen. Durch die Kombination beider Messinstrumente ist es möglich, nicht nur den gesamten Flüssigwasserpfad (LWP), sondern auch das Vertikalprofil des Wolkenwassergehalts (LWC) zu bestimmen. Dabei sollen auch erstmals räumlich abtastende Messungen von einzelnen Wolken (beide Geräte operieren im Scanmodus) durchgeführt werden. In die Auswertung werden auch die anderen im Rahmen der Intensivmessphasen von CLIWA-NET durchgeführten Messungen mit eingehen. Die im Rahmen von 4DWOLKEN durchgeführten Flugzeugmessungen des Tropfenspektrums werden für die Validation des Verfahrens eingesetzt. Die so bestimmte Wolkenvariabilität wird als Input benötigt für a) Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen mikrophysikalischer Variabilität und der Strahlungsbilanzeffekte der Wolken (Projektpartner IPA Mainz), b) für die Algorithmenentwicklung für Satellitenexperimente (Projektpartner IfM Kiel und TUD Dresden) und c) Untersuchungen der räumlich-zeitlichen Skalierungseigenschaften der Bewölkung (Projektpartner IUP Heidelberg). (Arbeitspakete: 2100 und 2200)

- Quantifizierung des Anteils von Niederschlag im Gesamtflüssigwasser
Das Auftreten großer Tropfen ($r > 40 \mu\text{m}$) in Wolken bzw. das Ausfallen von Niederschlagstropfen, die auf dem Weg zum Erdboden verdunsten, können zur fehlerhaften Interpretation von Fernerkundungsmessungen in allen Spektralbereichen führen. Insbesondere kann dieser Effekt Strahlungsbilanzkalkulationen auf der Basis von Radarreflektivitäten (proportional r^6) extrem verfälschen. Messungen innerhalb des ARM Projekts (USA) [Clothiaux, persönliche Mitteilung] deuten darauf hin, daß dies sehr häufig der Fall ist. Bis jetzt konnten einige dieser Situationen durch die Messung der Dopplergeschwindigkeit vom Radar und der Ceilometer Rückstreuung erkannt werden. Zu einer sensitiveren Erkennung und einer Quantifizierung soll die Polarisation des passiven Mikrowellensignals genutzt werden. (Arbeitspakete: 2200, 3100 und 3300)

- Einfluss inhomogener Bewölkung auf Energie- und Wasserkreislauf
Das Ziel ist die Untersuchung des Einflusses inhomogener Bewölkung auf die Transportprozesse in der Grenzschicht. Um dies zu ermöglichen, werden realitätsnahe Simulationen mit dem Lokalmmodell des DWD durchgeführt, die 3D-Strahlungseffekte berücksichtigen und in denen realistische Wolkenwassergehalte assimiliert werden. (Arbeitspaket 4300)

b) Technische Ziele

- Synergie von Sensoren
Es werden bodengebundene Fernerkundungsalgorithmen für Wolken entwickelt, die Messungen unterschiedlicher Sensoren (passives Mikrowellenradiometer, Wolkenradar, Lidar Ceilometer, Infrarotradiometer) kombinieren und dreidimensionale Effekte mit berücksichtigen. Durch die unterschiedlichen Sensitivitäten der verschiedenen Messinstrumente gegenüber dem Tropfenradius (Ceilometer $\sim r^2$, Mikrowelle $\sim r^3$, Radar $\sim r^6$) können grobe Schätzungen über die Parameter der Tropfenverteilung gemacht werden. Die Hinzunahme einer unabhängigen Messung bei der Bestimmung eines Parameters kann dessen Genauigkeit wesentlich verbessern (z.B. LWP Hinzunahme bei der LWC Bestimmung aus Z).

- Assimilation von Wolken

Dazu soll der Wolkenwassergehalt, der ein prognostischer Parameter in dem Lokalmodell (LM) des DWD darstellt, in dieses nichthydrostatische Modell assimiliert werden. Die Eingabedaten stammen dabei aus den Messungen von 4DWOLKEN und CLIWA-NET.

2. Stand der Wissenschaft und Technik; bisherige Arbeiten

2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Flüssigwassergehalt kontinentaler Wolken lässt sich – abgesehen von sporadischen Flugzeugmessungen – nur sehr schwer quantitativ erfassen. Mit passiver Mikrowellenradiometrie kann die Flüssigwassersäule [Westwater, 1978, Karstens et al., 1994] zusammen mit Temperatur- und Feuchtestruktur der Grenzschicht und der unteren Troposphäre [Askne und Westwater, 1986; Crewell et al., 1999] recht genau und zeitlich hoch aufgelöst bestimmt werden. Aus diesem Grund bildet ein bodengebundenes Netz von Mikrowellenradiometern die Basis zur Bestimmung von globalen Feldern des Wolkenwassergehaltes in dem EU-Projekt CLIWA-NET, das vom MIUB gemeinsam mit dem KNMI initiiert wurde. Ein zentrales Instrument innerhalb von CLIWA-NET ist das 22 Kanal Radiometer MICCY (Microwave radiometer for Cloud Cartography) des Meteorologischen Instituts der Universität Bonn. Dieses weltweit einzigartige Radiometer ist mit seiner räumlichen Auflösung von weniger als 1° in allen Kanälen und einer Gesamtintegrationszeit aller Kanäle von 1 Sekunde ideal zur Vermessung räumlich variabler Wolken geeignet [Crewell et al., 2000]. Die Frequenzkombination des Radiometers beinhaltet auch Information über die vertikale Verteilung des Wolkenwassers [Solheim et al., 1998; Crewell et al., 1999].

Um das Wolkenwasserprofil mit möglichst hoher vertikaler Auflösung und Genauigkeit zu messen, ist die Kombination mit den Profilen des Radarreflektivitätsfaktors (Z) gemessen mit einem Wolkenradar optimal. Bisher wurde der von 2-Kanal Mikrowellenradiometern gemessene LWP dazu benutzt, Standard Z-LWC Beziehungen zu skalieren [Frisch et al., 1995, 1998]. Die Einbeziehung eines mittleren Modellprofils und der Fehlerstatistiken zur Z-LWC Beziehung mittels der *Optimal Estimation* Methode [Rodgers, 1976] führt zu Verbesserungen [Löhnert et al., 1999]. Derzeit wird dieses Verfahren von uns auf die Mehrkanalinformation von MICCY erweitert und Messungen einer ersten Testkampagne, die im Oktober 1999 zusammen mit dem 95 GHz Radar des Forschungszentrum Geesthacht durchgeführt wurde, ausgewertet. Bei den dort durchgeführten Messungen waren beide Instrumente zum Zenit gerichtet. Die bisher noch nicht angewandte Möglichkeit, MICCY und das Wolkenradar der GKSS MIRACLE in Azimuth und Elevation zu schwenken, wird auf Grund der sehr guten räumlichen Auflösung des Radiometers ermöglichen, Einzelwolken 3-dimensional zu erfassen (geometrische Ausdehnung, LWC, effektiver Radius¹).

Ein Prozess, der die direkte Konvertierung der vom Radar gemessenen Reflektivitäten (proportional zur 6. Potenz des Durchmessers der rückstreuenden Teilchen) zum LWC kompliziert, ist die Bildung von Niesel- und Niederschlagspartikeln, die aufgrund ihrer Größe das Wolkensignal maskieren [Fox und Illingworth, 1997]. Häufig verdunsten die aus der Wolke ausfallenden Partikel innerhalb kurzer Zeit, so dass sie am Erdboden nie als Niederschlag auftreten. Die Existenz von großen bei insitu Flugzeugmessungen nicht erfassten Wolkentropfen zur Erklärung der überhöhten Wolkenabsorption wird von Wiscombe et al. [1984] und Lubin et al. [1996] diskutiert. Von der Arbeitsgruppe wurde ein neuartiges Verfahren [Czekala et al., 1999] vorgeschlagen, dass die Asphärizität der Niederschlagsteilchen und das dadurch entstehende Polarisationsignal ausnutzt, um den Anteil von Wolken- und Niederschlagswasser zu trennen. MICCY ist dazu gut geeignet. Der dreidimensionale Strahlungstransfer im Mikrowellenbereich ist zwar schon realisiert worden [Liu et al., 1996], jedoch noch nicht mit asphärischen Teilchen.

¹ kann unter Annahme einer Lognormal-Verteilung aus synergetischen Algorithmen abgeleitet werden

Viele numerische Modellstudien haben gezeigt, wie groß der Einfluss von Wolken auf die atmosphärische Grenzschicht ist (z.B. McNider et al. 1995; Lipton 1993). Mit den im Verbundprojekt von der Arbeitsgruppe IPA Mainz (Trautmann) entwickelten Parametrisierungen der 3D-Strahlungseffekte für das Lokalmodell des DWD werden deren Auswirkungen auf die Grenzschicht untersucht. Diese Erweiterungen des LM werden in Kooperation mit dem DWD in die derzeit laufenden Entwicklungsarbeiten zur Initialisierung des LM mit hydrometeorologischen Parametern [Haase und Simmer, 1999; Braun et al., 2000] und der Assimilation der Strahlungseffekte von Wolken aufgenommen werden. Hierzu ist es notwendig neue Verfahrensansätze zu entwickeln, welche die komplexen Wolkenparameter berücksichtigen.

Zitierte Literatur:

- Askne, J. and E. Westwater, 1986: A review of ground-based remote sensing of temperature and moisture by passive microwave radiometers, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-24, 340-352.
- Boers, R., H. Russchenberg, J. Erkelens, V. Venema, A. Van Lammeren, A. Apituley, S. Jongen, 2000: Ground-based remote sensing of stratocumulus properties during CLARA, 1996. *J. Appl. Met.*, **39**, 169-181.
- Braun, P., B. Maurer, G. Müller, P. Gross, G. Heinemann und C. Simmer, 2000: An integrated approach for the determination of regional evapotranspiration using mesoscale modelling, remote sensing and boundary layer measurements, *Meteorol. Appl. Phys.*, (angenommen).
- Crewell, S., H. Czekala, U. Löhnert, C. Simmer, T. Rose, R. Zimmermann und R. Zimmermann, 2000: MICCY – a 22 channel ground-based radiometer for atmospheric research, *Radio Science* (eingereicht)
- Crewell, S., U. Löhnert, C. Simmer, 1999: Remote Sensing of Liquid Water Profiles Using Microwave Radiometry, *Remote Sensing of Cloud Parameters: Retrieval and Validation, Symposium Proceedings*, 21-22 October 1999, Delft University of Technology, 45-50.
- Czekala, H., A. Thiele, A. Hornbostel, A. Schroth, C. Simmer, 1999: Polarized microwave radiation from nonspherical cloud and precipitation particles, *Remote Sensing of Cloud Parameters: Retrieval and Validation, Symposium Proceedings*, 21-22 October 1999, Delft University of Technology, 71-76.
- Fox, N. I., A. Illingworth: 1997: The potential of a spaceborne cloud radar for the detection of stratocumulus, *J. Appl. Meteor.*, **36**, 676-687.
- Frisch, A. S., C. W. Fairall, J. B. Snider, 1995: Measurement of stratus cloud and drizzle parameters in ASTEX with a K α -band radar and a microwave radiometer, *J. Atmos. Sci.*, **52**, 2788-2799.
- Frisch, A. S., G. Feingold, C. W. Fairall, T. Uttal, J. B. Snider, 1998: On cloud radar and microwave radiometer measurements of stratus cloud liquid water profiles, *J. Geophys. Res.*, **103**, 23,195-23,197.
- Haase, G. und C. Simmer, 1999: Simulation and assimilation of radar reflectivities using a mesoscale model. *Geophysical Research Abstracts*, Volume 1, 24. General Assembly, Hydrology, Oceans and Atmosphere, 486.
- Han, Y., and E. Westwater, 1995: Remote sensing of tropospheric water vapor and cloud liquid water by integrated ground-based sensors, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 1050-1059.
- Karstens, U., C. Simmer, und E. Ruprecht, 1994: Remote sensing of cloud liquid water content. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **54**, 157-171.
- Liu, Q., C. Simmer, C. and E. Ruprecht, 1996: Three-dimensional radiative transfer effects of clouds in the microwave spectral range, *J. Geophys. Res.*, **101**, 4289-4298.
- Löhnert, U., S. Crewell, C. Simmer, 1999: Combining a cloud radar, a passive microwave radiometer and a cloud model to obtain cloud liquid water, *Remote Sensing of Cloud Parameters: Retrieval and Validation, Symposium Proceedings*, 21-22 October 1999, Delft University of Technology, 101-106.
- Lipton, A.E., 1993: Cloud shading retrieval and assimilation in a satellite-model coupled mesoscale analysis system. *Monthly Weather Review*, **121**, 3062-3081.

Lubin, D., J.-P. Chen, P. Pilewskie, and F. P. J. Valero, 1996: Microphysical examination of excess cloud absorption in the tropical atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **101**, 16961-16972.

McNider, R.T., J.A. Song, and S.Q. Kidder, 1995: Assimilation of GOES-derived solar insolation into a mesoscale model for studies of cloud shading effects. *International Journal of Remote Sensing*, **16**, 2207-2231.

Rodgers, C. D., 1976: Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation, *Rev. of geophysics and space Physics*, **14**, 609-624.

Solheim, F., J. Godwin, E. R. Westwater, Y. Han, S. Keihm, K. Marsh, R. Ware, 1998: Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods, *Radio Science*, **33**, 393-404.

Westwater, E., 1978: The accuracy of water vapor and cloud liquid determination by dual-frequency ground-based microwave radiometry, *Radio Science*, **13**, 667-685.

Wiscombe, W. J., R. M. Welch, and W. W. Hall, 1984: The effect of very large drops on cloud absorption, 1, Parcel models. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1336-1355.

2.2 Bisherige Arbeiten der Antragsteller

Die Antragsteller haben eine langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Fernerkundung (insbesondere im Mikrowellenbereich) und der Mesoskaligen Modellierung. Insbesondere im Bereich der Mikrowellenfernerkundung wird seit mehr als 10 Jahren an Geräte-entwicklungen, Messkampagnen, Strahlungstransport und Algorithmenentwicklungen gearbeitet. In der Gruppe werden mehrere bodengebundene Fernerkundungsinstrumente betrieben (Mikrowellenradiometer, Lidar Ceilometer, Infrarotradiometer und Radar) und Algorithmen für die Bestimmung meteorologischer Parameter entwickelt. Die Antragsteller verfügen über langjährige Erfahrung in der Organisation und Durchführung koordinierter Messkampagnen (S. Crewell seit 1990). Die Gruppe ist an den COST Aktivitäten 712 (Anwendung der Mikrowellenradiometrie vom Satelliten in der Meteorologie) und 717 (Nutzung von Radar in hydrologischen und Wettervorhersagemodellen) beteiligt. An der Evaluierung und Weiterentwicklung (inkl. Assimilation) des Lokalmodell des DWD wird in der Arbeitsgruppe seit 1996 gearbeitet. Einige für das Forschungsvorhaben relevante Publikationen sind im folgenden aufgelistet:

Braun, P., B. Maurer, G. Müller, P. Gross, G. Heinemann und C. Simmer, 2000: An integrated approach for the determination of regional evapotranspiration using mesoscale modelling, remote sensing and boundary layer measurements, *Meteorol. Appl. Phys.*, (angenommen).

Crewell, S., H. Czekala, U. Löhnert, C. Simmer, T. Rose, R. Zimmermann und R. Zimmermann, 2000: MICCY – a 22 channel ground-based radiometer for atmospheric research, *Radio Science*, (eingereicht)

Crewell, S. G. Haase, U. Löhnert, H. Mebold, und C. Simmer. A Ground Based Multi-Sensor System for the Remote Sensing of Clouds. *Phys. Chem. Earth (B)*, **24**, 207-211, 1999

Czekala, H., C. Simmer, 1998: Microwave radiative transfer with non-spherical precipitating hydrometeors, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **60**, 365-374.

Czekala, H., 1998: Effects of ice particle shape and orientation on polarized microwave radiation for off-nadir problems, *Geophys. Res. Lett.*, **25** (10), 1669-1672.

Czekala, H., S. Havemann, K. Schmidt, T. Rother, and C. Simmer, 1999: Comparison of microwave radiative transfer calculations obtained with three different approximations of hydrometeor shape, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **63**, 545-558.

Drusch, M., C. Simmer, und E. F. Wood, 1999: Up-scaling effects in passive microwave remote sensing: ESTAR 1.4 GHz measurements during SGP'97. *Geophysical Research Letters*, **26**, 879-882.

Fuhrhop, R., Th. C. Grenfell, G. Heygster, K.-P. Johnson, P. Schlüssel, M. Schrader, und C. Simmer, 1998: A combined radiative transfer model for sea-ice, open ocean and atmosphere. *Radio Science*, **33**, 303-316.

Haase, G. and S. Crewell, 2000: Simulation of radar reflectivities using a mesoscale weather forecast model. *Water Resources Research*, (angenommen).

Karstens, U., C. Simmer, und E. Ruprecht, 1994: Remote sensing of cloud liquid water content. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **54**, 157-171.

Liu, Q., C. Simmer, C. and E. Ruprecht, 1996: Three-dimensional radiative transfer effects of clouds in the microwave spectral range, *J. Geophys. Res.*, **101**, 4289-4298.

Liu, Q., G. König-Langlo, and C. Simmer, 1998: Surface Radiation Measurements from Polar Stations. *Phys. Chem. Earth*, **23**, 593-598.

Liu, Q., C. Simmer, and E. Ruprecht., 1998: Monte Carlo simulations of the microwave emissivity of the sea surface. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 24,983-24,989.

Simmer, C., 1999: Contributions of microwave remote sensing from satellites to studies on the Earth energy budget and the hydrological cycle. *Advances in Space Research*, **24**, 897-905.

3. Ausführliche Beschreibung des Arbeitsplans

3.1 Vorhabensbezogene Planung

Arbeitspaket 1000: Koordinierung

Die Antragssteller übernehmen die Gesamtkoordination des Verbundprojektes 4DWOLKEN (siehe auch Verbundantrag und Kooperationsvereinbarung), die auch die finanzielle Abwicklung beinhaltet. Dazu gehört insbesondere die Koordinierung mit dem EU Projekt CLIWA-NET. Die gute Verbindung ist dadurch gewährleistet, dass eine Antragstellerin (S. Crewell) dem Management Team von CLIWA-NET angehört und innerhalb von CLIWA-NET für die Organisation sämtlicher bodengebundener Messungen verantwortlich ist. Als weitere Aufgaben fallen in diesem Arbeitspaket die Vorbereitung der Arbeitstreffen, die Kommunikation zwischen den einzelnen Arbeitspaketen und den Partnern von 4DWOLKEN und die Koordinierung der Berichte und Publikationen an.

Arbeitspaket 2100: BBC Experiment (koordiniert durch IFT)

Innerhalb dieses Arbeitspaketes werden die bodengebundenen Messungen mit MICCY durchgeführt. Durch CLIWA-NET werden kontinuierliche Langzeitmessungen (2 Monate) finanziert. Für 4DWOLKEN werden zusammen mit dem Wolkenradar der GKSS koordinierte Abtastungen von Wolken in Azimut und Elevation bei ausgewählten Ereignissen koordiniert mit Flugzeugüberflügen durchgeführt. Um eine in Raum und Zeit möglichst exakte Kolokation beider Messungen zu gewährleisten, damit so die Variabilität im LWC genau bestimmt werden kann, muss die Datenaufnahmesoftware aufeinander abgestimmt werden. In diesem Arbeitspaket, das sich auf die Erfassung von Messwerten konzentriert, wird weiterhin die Übernahme von Daten, die während der BBC-Kampagne von den CLIWA-NET Partnern gemessenen wurden, geregelt. Dies beinhaltet auch den Transfer von 4DWOLKEN-Daten an das CLIWA-NET Konsortium

Arbeitspaket 2200: 4D-Wolkenanalyse (koordiniert durch MIUB)

Dieses Arbeitspaket, das die quantitative Beschreibung der räumlich-zeitlichen Variabilität von Wolken (verschiedene Parameter auf verschiedenen Skalen) ausgehend von sämtlichen Messungen der BBC-Kampagne als Ziel hat, wird vom MIUB koordiniert. Vom MIUB werden als Input die Zeitreihen von LWP/IWV², Temperatur- und Feuchteprofil zur Verfügung gestellt. Dazu kommen die Flüssigwasserprofile für die mit dem Wolkenradar koordinierten

² Integrated Water Path (Gesamtwasserdampfgehalt)

Messungen. Zur Untersuchung des Anteils großer Tropfen am Gesamtflüssigwassergehalt werden Algorithmen entwickelt, die auf dem Polarisationsignal der passiven Mikrowelle basieren. Im Rahmen der Koordination dieses Arbeitspaketes findet eine genaue Produktdefinition statt, die alle Eingangsdaten (Messgrößen) und Ausgangsprodukte (Resultate) festlegt. Dabei findet eine enge Absprache sowohl mit dem Arbeitspaket 2100 (IfT) für die Eingangsdaten, als auch mit 3200 (IUP) und 3300 (IPA) für die Ausgangsdaten, die von diesen als Input benötigt werden, statt.

Arbeitspaket 3100: 3D-Strahlungstransport-Entwicklung (exakt) (koordiniert durch IPA)
Hier wird ein existierendes 3D-Mikrowellen- Strahlungstransportmodell [Liu et al., 1996] so erweitert, dass auch die Streuung an asphärische Teilchen berücksichtigt wird. Diese Erweiterung, die notwendig ist um die Algorithmen für die Erkennung großer und dadurch abgeplatteter Teilchen zu entwickeln, ist bis jetzt nur in einem 1-dimensionalen Modell [Czekala et al., 1999, Czekala und Simmer, 1998] implementiert. Im wesentlichen muss daher die Abhängigkeit der Strahlungswechselwirkungsparameter, die gegenwärtig im Streukoordinatensystem formuliert sind, in eine Abhängigkeit vom Absolutkoordinatensystem transformiert werden. Dadurch gewinnen die Nichtdiagonalelemente der Strahlungswechselwirkungsparameter (insbesondere Extinktionsmatrix und Phasenfunktionsmatrix) an Bedeutung. Die für das 1D-Modell verwendeten Einfachstreuemodelle für asphärische Teilchen (z.B. T-Matrix Methode) können beibehalten werden.

Arbeitspaket 4100: 3D-Strahlungstransport (dynamische Modelle) (koordiniert durch IPA)
Beim Einbau der im Arbeitspaket 3300 von den anderen Projektpartnern entwickelten 3D-Strahlungsparametrisierung für wolkenauflösende Modelle in das LM wird Hilfe geleistet und die entsprechenden Verfahren ausgetestet.

Arbeitspaket 4300: Dynamische Wolkeneffekte (koordiniert durch GKSS)
In diesem Arbeitspaket, das die Analyse des Einflusses von 4D-Bewölkung auf Energie- und Wasserkreislauf zum Ziel hat, wird zunächst die Assimilation von 3D-Wolkenwassergehalten (bestimmt im Arbeitspaket 2200) aufbauend auf einem bereits erprobten Initialisierungsverfahren für regnende Wolken entwickelt. Die dadurch und durch die 3D-Strahlungsparametrisierung entstehenden Effekte, insbesondere die Auswirkungen auf die Transporte in der Grenzschicht, werden untersucht. Dabei geht es auch um die räumliche Struktur der Energie- und Wasserdivergenzen. Ein wichtiger Untersuchungspunkt dabei ist auch die horizontale Auflösung des Lokalmodells. Dazu werden die gleichen Fälle mit mehreren Auflösungen gerechnet.

3.3 Meilensteinplanung

Zur besseren Fokussierung der Forschungsaktivitäten innerhalb des Verbundes spielen die Arbeitstreffen eine grosse Rolle und sind wichtige Meilensteine des Projekts. Dort wird jeweils über den aktuellen Stand aller Arbeitspakete berichtet und die anstehenden Ziele neu diskutiert. Mit einem Projektbeginn am 1.10.2000 ergibt sich folgender Zeitplan (in Projektmonaten):

Erstes Förderjahr

1. Treffen (Kickoff: Monat 2): Hier wird die Detailplanung des Projektes festgelegt. Dies beinhaltet sowohl die Zeitplanung, die verbindliche Definition der Schnittstellen zwischen den einzelnen Arbeitspaketen als auch die Festlegung einer Datenaustauschpolitik insbesondere mit CLIWA-NET. Bereits bei diesem Treffen wird die Diskussion über die optimale Strategie für das Messexperiment breiten Raum einnehmen, um wichtige Aspekte bereits im Rahmen der 2. CLIWA-NET Messperiode (April/Mai 2001) zu berücksichtigen und gegebenenfalls zu testen.

2. Treffen (Experimentplanung: Monat 6): Die detaillierte Planung der Messkampagne inklusive Messtrategien wird angesichts der Erfahrungen aus CLIWA-NET abgestimmt und die Logistik vor Ort abgeklärt.

In der Vorbereitungsphase zur Messkampagne muss mit der GKSS abgestimmt werden, wie die koordinierte Abtastung der Wolken in Azimut und Elevation durchgeführt werden soll. Durch die in April/Mai 2001 in Geesthacht stattfindene CLIWA-NET Kampagne, bei der das Bonner Mikrowellenradiometer in Geesthacht stationiert sein wird, sind erste Testmessungen möglich. Sowohl Datenaufnahme- als auch Auswertesoftware müssen bis dahin angepasst werden.

Parallel zu den Vorbereitungen der Messkampagne wird die Weiterentwicklung eines bereits bestehenden 3D Modells für den Mikrowellenbereich [Liu et al. 1996] durchgeführt. Dieses Modell muss noch um die Berücksichtigung asphärischer Niederschlagspartikel erweitert werden. Dies erfordert die Berücksichtigung des vollständigen Stokes-Vektor, der bisher nur im 1D Modell [Czekala und Simmer, 1998] berücksichtigt wurde. Die Entwicklung wird Ende des 1. Jahres abgeschlossen sein.

Messkampagne: Monat 11-12 Durchführung von speziellen Messungen zur dreidimensionalen Erfassung von Wolken durch Abtasten in Azimuth und Elevation zeitgleich mit dem Wolkenradar des Projektpartners GKSS. Zur Trennung des Signals von Wolken- und Niederschlagspartikeln sollen spezielle Messungen unter flacher Elevation durchgeführt werden. Die Messungen erfolgen in Abstimmung mit den Flugzeugmessungen (IfT Leipzig).

Zweites Förderjahr

Nach der Fertigstellung des 3D-Mikrowellen-STP wird mit diesem Modell eine große Anzahl von 3D-Strahlungstransportrechnungen für 3D Wolkenfelder durchgeführt. Als Input dienen sowohl die Wolkenmodellierungen von dem Projektpartner IfM Kiel (nichthydrostatisches Mesoskalenmodell GESIMA) und dem Kooperationspartner MPI Hamburg (LES Wolkensimulationen) als auch die mikrophysikalischen Messungen (IfT Leipzig). Diese Simulationen werden bis zum 3. Treffen abgeschlossen.

3. Treffen (Auswertung: Monat 19): Zu diesem Zeitpunkt ist die erste Auswertung der Messkampagne abgeschlossen, d.h. Zeitserien von LWP/IWV, Temperatur und Feuchteprofile werden den Projektpartnern in einer Datenbank zur Verfügung gestellt. Von den durch Synergie mit dem Wolkenradar abgeleiteten LWC-Profilen wird eine erste Version vorliegen.

Basierend auf den 3D-STP Mikrowellensimulationen wird ein Algorithmus zur quantitativen Bestimmung des integrierten Flüssigwassergehaltes bei gleichzeitiger Trennung der Anteile von Wolken- und Niederschlagspartikeln entwickelt. Die Daten der Messkampagne werden bezüglich der Intensität und Häufigkeit dieses Phänomens, insbesondere der mögliche Zusammenhang mit der überhöhten Wolkenabsorption solarer Strahlung, analysiert. Diese Analyse soll bis zum 4. Treffen abgeschlossen sein

Drittes Förderjahr

Zur detaillierten Auswertung der Messkampagne werden Fernerkundungsalgorithmen für die synergetische Nutzung von passivem Mikrowellenradiometer, Wolkenradar, Lidar Ceilometer und Infrarotradiometer unter Berücksichtigung von dreidimensionale Effekten abschließend entwickelt. Die theoretischen Arbeiten hierzu werden bereits im zweiten Förderjahr begonnen

4. Treffen (Datenzusammenführung: Monat 26): Nachdem die Auswertung der Messkampagne der Einzelmessungen abgeschlossen ist, präsentieren die Teilnehmer ihre Ergebnisse. Nach diesem Treffen, das nach Möglichkeit mit einem CLIWA-NET Arbeitstreffen gekoppelt wird, soll vor allem die Synthese der verschiedenen Messungen und Auswertungen im Vordergrund stehen, um a) die Problematik der überhöhten

Absorption und b) der Ansätze zur parametrischen Behandlung des 3D-Strahlungstransports zu diskutieren.

Beginnend mit dem Ende der Messkampagne bis zum Ende der ersten Phase von 4DWOLKEN nach drei Jahren wird an der Analyse und Quantifizierung der 4-dimensionalen Variabilität von Wolken gearbeitet. Zunächst erfolgt dies auf der Basis der eigenen Messungen, dann im Hinblick auf eine Synthese mit den Messungen der anderen Verbundpartner. Erste Ergebnisse werden daher allen Projektpartnern möglichst früh zur Verfügung stehen müssen. Die Endergebnisse werden auf dem Abschlusstreffen der ersten Phase präsentiert.

5. Treffen (Abschluss Phase 1: Monat 35): Hier werden die Resultate der einzelnen Arbeitspakete vorgestellt und der Übergang in die 2. Phase von 4DWOLKEN vorbereitet. Dazu gehört eine Evaluierung der bestehenden Planungen auf der Basis der bis dahin erzielten Ergebnisse und der Entwicklungen außerhalb des Verbunds. Evtl. wird auch eine Neustrukturierung der Arbeitstreffen in Phase 2 erfolgen.

Viertes Förderjahr

Das Assimilationschema von Wolkenwassergehalten in das nichthydrostatische Lokalmodell des DWD wird entwickelt. Parallel werden bereits Simulationen mit dem LM für die Experimentphase durchgeführt, um die Rolle der modellierten Wolken an den Austauschprozessen vor der Implementation der Neuentwicklungen zu quantifizieren und um Strategien für die Bewertung zu entwickeln. Die vom Verbundpartner IPA Mainz entwickelten Parametrisierungen zu den 3D-Strahlungseffekten werden in Kooperation mit dem DWD in die derzeit laufenden Entwicklungsarbeiten zur Initialisierung des LM mit hydrometeorologischen Parametern und der Assimilation der Strahlungseffekte von Wolken aufgenommen werden.

6. Treffen (Zwischenbilanz Phase 1: Monat 47): Erste Ergebnisse zur Untersuchung des Einflusses inhomogener Wolken auf die Grenzschicht werden vorgestellt.

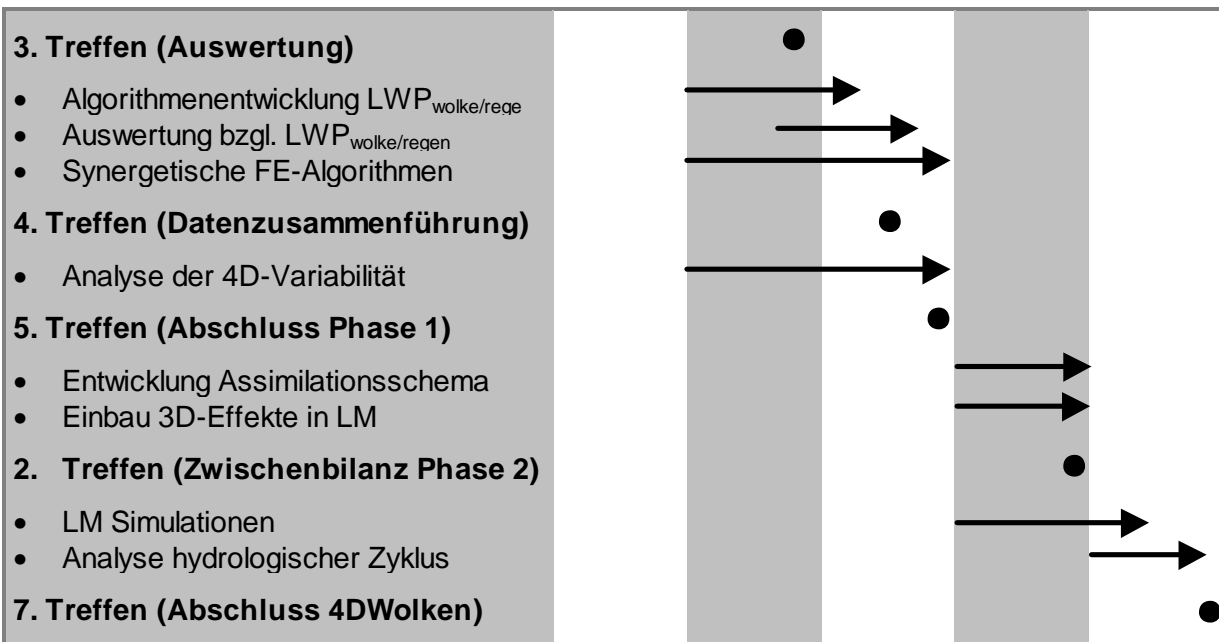
Fünftes Förderjahr

Mit dem Lokalmodell wird eine Reihe von Fallstudien mit dem neuen Assimilationschema gerechnet und dazu genutzt den hydrologischen Zyklus zu untersuchen. Vergleich mit und ohne 3D-Parametrisierung werden durchgeführt und bewertet. Die Simulationen werden zusätzlich für unterschiedliche horizontale Modellauflösungen durchgeführt, um die Sensitivität der neuen Strahlungsmodule auf die Modellskalen zu testen.

7. Treffen (Abschluss 4DWOLKEN: Monat 59): Die Endergebnisse von 4DWOLKEN werden vorgestellt und der bis dahin vorliegende vorläufige Endbericht diskutiert.

Der folgende **Balkenplan** faßt die Meilensteinplanung (s. Abschnitt 3.2 der Vorhabensbeschreibung) für das beantragte Projekt zusammen:

Projekt-Monat	1-12	13-24	25-36	37-48	49-60
1. Treffen (Kickoff)	●				
• Vorbereitung Meßkampagne	→				
2. Treffen (Experimentplanung)	●				
• Durchführung der Meßkampagne	→				
• Auswertung Meßkampagne		→			
• Weiterentwicklung 3D-STP-Modell	→	→			
• 3D-STP Simulationen		→			



4. Verwertungsplan

4.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Angesichts der langjährigen Erfahrung bei der logistischen Planung und Durchführung von Meßkampagnen wird davon ausgegangen, daß die geplanten Messungen in Koordination mit den anderen Gruppen erfolgreich durchgeführt werden. Es ist mit einem verlässlichen Datensatz zu rechnen. Die verwendeten Meßgeräte sind erprobt. Zum Themenkomplex Assimilation besteht am Institut eine umfangreiche Erfahrung (siehe 2.2 Bisherige Arbeiten).

4.2 Wissenschaftliche Anschlußfähigkeit

Es werden Veröffentlichungen in internationalen, begutachteten Zeitschriften gemeinsam mit den Partnern des Projektverbundes 4DWOLKEN bzw. CLIWA-NET zu den Ergebnissen des Projektes angestrebt. Insbesondere auf den Gebieten der Mikrowellenradiometrie, der Messung von Flüssigwasserprofilen, Algorithmenentwicklung und der Kopplung mit der feinauflösenden Atmosphärenmodellierung wird mit neuen Erkenntnissen gerechnet.

5.2 Zusammenarbeit mit Dritten

Das beantragte Vorhaben ist Bestandteil des Verbundprojektes 4DWOLKEN. Die Zielstellung dieses Verbundprojektes kann nur in koordinierter Zusammenarbeit der beteiligten deutschen Forschungsgruppen erreicht werden. Der vorliegende Projektantrag trägt zu 4DWOLKEN neben der Koordinierung des Projekts durch die Bestimmung der 4 dimensional Variabilität des Wolkenwassergehaltes mittels neuartiger Messmethoden bei. Diese werden von verschiedenen Projektpartnern benötigt (siehe Verbundantrag).

Durch die Kombination von 4DWOLKEN und CLIWA-NET werden weitere synergetische Effekte durch eine gezielte Zusammenarbeit zwischen beiden Projekten möglich. Insbesondere zusammen mit der Modellierungsgruppe in CLIWA-NET, die sich mit der Evaluierung und Verbesserung von Wolkenparametrisierungen in Wettervorhersage- und Klimamodellen beschäftigt, wird das Verständnis des Wasserkreislaufes in der unteren Troposphäre verbessert.

Bei der Entwicklung des 3D-Mikrowellenstrahlungstransportmodells besteht eine Kooperation mit der Dr. Stefan Bühler (IUP Bremen), der im Rahmen von AFO2000 eine Nachwuchsgruppe aufbauen wird. Mit Bernard Mayer (DLR Oberpfaffenhofen) besteht bzgl. der Strahlungstranportmodellierung ebenfalls eine Kooperation.

Darüber hinaus bestehen enge Kontakte zu international angesehenen Wissenschaftlergruppen:

- NASA GISS, New York, USA (Wolkenfernerkundung)
- NOAA ETL, Boulder, USA (Radar/Mikrowelle)
- KNMI, Niederlande (Synergie von Sensoren)
- IAP Bern, Schweiz (Mikrowellenradiometrie)

Antragsteller:
Dr. Manfred Wendisch
Institut für Troposphärenforschung (IfT)
Permoserstr. 15
04318 Leipzig
Tel: 0341/235-2469
Fax: 0341/235-2361
E-mail: wendisch@tropos.de

VORHABENSBE SCHREIBUNG ZUM THEMA:

4D Bewölkung der unteren Atmosphäre (4DWOLKEN): Flugzeuggetragene Messungen von mikrophysikalisch-optischen und Strahlungseigenschaften inhomogener Bewölkung in der unteren Troposphäre:

1. Ziele

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das beantragte Vorhaben ist Bestandteil des Verbundprojektes 4DWOLKEN. Eines der Ziele dieses Projektverbundes ist es, einen Beitrag zu liefern zur Aufklärung des Phänomens der „überhöhten Absorption in Wolken“. Das Problem besteht darin, daß im Vergleich zu Modellrechnungen signifikant überhöhte Werte der Absorption durch Wolken gemessen werden. Die Diskrepanzen zwischen modellierter und berechneter Wolkenabsorption sind drastisch, so daß eine Aufklärung dieses Problems zwingend notwendig ist, sowohl zur Verbesserung des Systemverständnisses der Atmosphäre als auch zur Erhöhung der Qualität von numerischen Wettervorhersagemodellen von der Mikroskala bis hin zum globalen Maßstab.

Als Ursache für die „überhöhten Absorption in Wolken“ kommen sowohl meßtechnische Probleme (z. B. unzureichende Genauigkeit und fehlende spektrale Auflösung der Strahlungsmessungen) als auch die inadäquate Behandlung wichtiger Komponenten in den Modellrechnungen (z. B. Voraussetzung horizontaler Homogenität, Nichtberücksichtigung der Aerosolpartikel) in Frage. Die Aufklärung der Ursachen für dieses Problem erfordert die enge Zusammenarbeit zwischen experimentellen und theoretisch ausgerichteten Arbeitsgruppen, wie sie innerhalb des Verbundprojektes 4DWOLKEN vorgesehen ist.

Der vorliegende Projektantrag soll zur Aufklärung des Problems der „überhöhten Absorption in Wolken“ beitragen durch die Bereitstellung von mikrophysikalisch-optischen und Strahlungsmessungen (sowie zusätzlichen meteorologischen Daten), die für die Modellberechnungen von anderen an 4DWOLKEN beteiligten Gruppen als Modelleingangsparameter (mikrophysikalisch-optische Daten) bzw. zur Verifikation für die Modellausgabewerte (Strahlungsmessungen) genutzt werden sollen. Im einzelnen werden flugzeuggetragene Messungen von mikrophysikalisch-optischen Eigenschaften von Aerosolpartikeln und Wolkentropfen in, unter und über stratiformen, kontinentalen Grenzschichtwolken durchgeführt und den anderen am Projektverbund 4DWOLKEN beteiligten Partnern zur Verfügung gestellt. Die Flugzeugmessungen werden durch bodengebundene Strahlungsmessungen ergänzt. Für die Messungen ist die Teilnahme an einer Feldmeßkampagne geplant, die kombiniert werden soll mit einer Intensivmeßphase innerhalb des EU-finanzierten Projektes CLIWA-NET. Außerdem sollen innerhalb dieses Projektes eindimensionale Strahlungsübertragungsrechnungen zeigen, ob und wie die möglichen Abweichungen zwischen Modell und Messung korreliert sind mit makro- und mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen (Förderprogramm)

Es besteht ein direkter Bezug zu **Thema I** der BMBF-Ausschreibung zum AFO 2000 Förderschwerpunkt: Unter 4. Aufgelistete Forschungsempfehlungen: „*Transportprozesse zwischen planetarer Grenzschicht und der freien Troposphäre unter besonderer Berücksichtigung von Wolkenbildung und Strahlungshaushalt*“ sowie „*Vertikalmessungen in der planetaren Grenzschicht und der unteren Troposphäre (... , Flugzeuge,...)*“.

Ein weiterer Bezug besteht auf die Empfehlung im Konzeptpapier, die „*große, unverstandene Diskrepanz zwischen experimentellen Ergebnissen und der modellmäßigen Beschreibung*“ (S. 1, Ende zweiter Abschnitt) des Strahlungstransportes in der bewölkten Atmosphäre zu erklären.

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Folgende Arbeitsziele sind geplant:

- **Flugzeuggetragene Messungen**

Es wird eine Flugzeug-Meßkampagne in Holland (Cabauw) im August/September 2001 vorbereitet (einschließlich Logistikplanung, Gerätekalibrierung und Adaption der wissenschaftlichen Ausrüstung an das Meßflugzeug), durchgeführt und ausgewertet. Dabei werden mikrophysikalisch-optische, Strahlungs- sowie ergänzende meteorologische Messungen realisiert. Das Feldexperiment sollen unter bewölkten Verhältnissen (stratiforme und durchbrochene Grenzschichtbewölkung) stattfinden und mit dem EU-geförderten Projekt CLIWA-NET kombiniert werden. Vertikal- und Horizontalprofile durch die Wolken sollen Aufschluß geben über die zeitlichen und örtlichen Wolkeninhomogenitäten in Bezug auf ihre mikrophysikalischen und Strahlungseigenschaften. Im einzelnen umfassen die Flugzeugmessungen:

- (i) **Flugzeuggetragene mikrophysikalisch-optische Messungen (Aerosolpartikel und Wolkentropfen)**

Für die Aerosolpartikel werden deren Größenverteilung, Volumenstreu- und Absorptionskoeffizient sowie die Anzahlkonzentration in verschiedenen Partikelgrößenbereichen gemessen. Für die Wolkentropfen wird ebenfalls die Größenverteilung innerhalb der Wolken bestimmt. Mit einem von der Größenverteilungsmessung unabhängigen Verfahren wird der Flüssigwassergehalt und der effektive Tropfenradius ermittelt.

- (ii) **Flugzeuggetragene Messung von Strahlungsgrößen**

Auf- und abwärtsgerichtete spektrale Strahlungsflußdichten im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 900 nm werden bestimmt. Eine horizontal stabilisierte Plattform wird für beide Meßköpfe (auf- und abwärtsgerichtet) zum Ausgleich der Flugzeugbewegung eingesetzt. Damit werden direkt Strahlungsflußdichten gemessen, die per Definition auf eine horizontale Empfängerfläche bezogen sind. Es entfallen dadurch aufwendige und mit erheblichen Meßunsicherheiten verbundene Korrekturen der Meßdaten nach dem Flug.

- (iii) **Flugzeuggetragene Messung von meteorologischen Parametern**

Zusätzlich zu (i) und (ii) werden statischer Luftdruck, Lufttemperatur und Relative Luftfeuchte sowie avionische Flugzeugdaten (Lagewinkel, Flugzeuggeschwindigkeit und -richtung) gemessen.

- **Bodengebundene Strahlungsmessungen**

Parallel zu den Flugzeugmessungen werden abwärtsgerichtete Strahlungsflußdichten bestimmt. Das bodengebunde Strahlungsspektrometer ist im wesentlichen baugleich zu den im Flugzeug verwendeten Systemen. Die spektrale optische Dicke der Aerosolpartikel

am Boden wird mit einem Sonnenphotometer bei durchbrochener Bewölkung in Wolkenlücken gemessen. Damit kann auch die optische Dicke der Wolken abgeschätzt werden.

- **Eindimensionale Strahlungsübertragungsrechnungen**

Es werden eindimensionaler Strahlungsübertragungsrechnungen auf der Basis der mikrophysikalischen und meteorologischen Flugzeugmessungen durchgeführt. Die Modellergebnisse werden verglichen mit den gemessenen spektralen Strahlungsflußdichten (Flugzeug und Boden). Es wird nach Korrelationen zwischen dem Grad der Abweichungen (zwischen Modell- und Meßergebnissen) und makro- und mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften (z.B. Grad der Wolkeninhomogenität) gesucht.

- **Verfügbarmachung der Messungen**

Während der dreijährigen Laufzeit für das beantragte Projekt werden die abgesicherten und konsistenten Meßdaten (Flugzeug und Boden) für die anderen an 4DWOLKEN (Gesamtlaufzeit fünf Jahre) beteiligten Projektpartner frei verfügbar gemacht.

2. Stand der Wissenschaft; bisherige Arbeiten

2.1 Stand der Wissenschaft

Wolken spielen eine wichtige Rolle im atmosphärischen Klimasystem (*Somerville, 1985; Arking, 1991*). Dabei zeichnet sich sowohl konvektive als auch stratiforme Bewölkung in der unteren Troposphäre (< 4 km Höhe) durch erhebliche zeitliche und örtliche (horizontal und vertikal) Inhomogenitäten aus in Bezug auf ihre makro- und mikrophysikalischen Eigenschaften, die nicht vernachlässigbare Effekte auf das atmosphärische Strahlungsfeld haben. Diese Effekte sind allgemein für das atmosphärische Systemverständnis von Bedeutung. Im speziellen haben diese mehrdimensionalen Strahlungseffekte Auswirkung auf klimatische Energiebilanzbetrachtungen, auf die Fernerkundung wolkenphysikalischer Parameter vom Satelliten aus (z.B. optische Dicke oder effektiver Tropfenradius), und auf dynamische Atmosphärenmodelle von der Meso-Skala bis hin zum globalen Maßstab (*Kiehl et al., 1995*).

Die deshalb notwendige dreidimensionale Behandlung der Strahlungsübertragung in der bewölkten Atmosphäre durch entsprechende Strahlungsmodelle ist in den letzten Jahren weit fortgeschritten (*Evans, 1998; O'Hirok und Gautier, 1998; Trautmann et al., 1999*). Der Einbau dieser komplizierten dreidimensionalen Strahlungsmodelle in dynamische Atmosphärenmodelle scheitert bisher an der notwendigen Rechenkapazität. Die Kopplung von dreidimensionalen Strahlungsberechnungen mit entsprechenden Messungen ist ebenfalls bis heute nicht hinreichend realisiert. Bisherige Vergleiche beruhen auf eindimensionalen Berechnungsergebnissen und ergeben ein inkonsistentes Bild, insbesondere in Hinblick auf die Wolkenabsorption. Eine Gruppe von Autoren stellt eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Strahlungseigenschaften von Wolken fest (z.B. *Slingo et al., 1982; Rawlins, 1989; Li et al., 1995; Imre et al., 1996; Stephens, 1996; Francis et al., 1997; Chou et al., 1998*). Andere Autoren wiederum ermitteln systematische Diskrepanzen zwischen berechneter und gemessener Absorption innerhalb von Wolken (*Fritz, 1951; Cess et al., 1995; Ramanathan et al., 1995; Pilewskie und Valero, 1995; Valero et al., 1997; Zender et al., 1997; Wendisch und Keil, 1999; Valero et al., 2000*). Die gemessene Absorption von solarer Strahlung ist dabei 20 bis 40 W m² höher im Vergleich zu berechneten Werten, wobei insgesamt nur ungefähr 80 W m² solare Strahlung in der gesamten Atmosphäre absorbiert werden (*Arking, 1999*). Bei *Wendisch und Keil (1999)* ist die Lücke zwischen gemessener und berechneter Absorption in der gleichen Größenordnung wie die gemessene absorbierte Strahlungsflußdichte selbst. Die Ursachen für diese ernsthafte Unstimmigkeit, die als das

Phänomen der „erhöhte Absorption in Wolken“ oder „Wolkenabsorptionsanomalie“ (*Stephens und Tsay*, 1990) bezeichnet wird, sind bis heute trotz intensiver internationaler Forschung auf diesem Gebiet nicht eindeutig geklärt (*Wiscombe*, 1995). Einer der aussichtsreichsten Kandidaten zur Erklärung des Phänomens ist die Nichtberücksichtigung von örtliche Wolkeninhomogenitäten in den Strahlungsmodellberechnungen (*Hayasaka et al.*, 1995; *Taylor et al.*, 1996; *Arking et al.*, 1996; *Marshak et al.*, 1997; *Marshak et al.*, 1998; *Barker et al.*, 1998). Andere Autoren machen Unklarheiten bei der Beschreibung der Wasserdampfabsorption in den Strahlungsberechnungen für die Diskrepanzen verantwortlich (*Cess et al.*, 1995; *Ramanathan et al.*, 1995; *Cess et al.*, 1996; *Arking*, 1996; *Francis et al.*, 1997; *Arking*, 1999). Probleme durch die unzureichende Berücksichtigung der optischen Aerosoleigenschaften in den Modellen, insbesondere in Bezug auf die Partikelabsorption, werden ebenfalls kontrovers in der Literatur im Zusammenhang mit dem Phänomen der „überhöhten Absorption in Wolken“ diskutiert (*Cess et al.*, 1995; *Li et al.*, 1995; *Zender et al.*, 1997; *Li*, 1998). Die Existenz von großen, bei den Messungen meist nicht erfaßten Wolkentropfen zur Erklärung der überhöhten Wolkenabsorption wird von *Wiscombe et al.* (1984) sowie *Lubin et al.* (1996) angesprochen. In die Wolkentropfen inkorporiertes absorbierendes Partikelmaterial (*Chylek et al.*, 1996; *Heintzenberg und Wendisch*, 1996) sowie Luftblasen in den Wolkentropfen (*Chylek et al.*, 1998) scheiden als Kandidaten zur Erklärung der Diskrepanzen aus.

Die Messung der Wolkenabsorption an sich ist ein grundsätzliches Problem mit erheblichen Meßungenauigkeiten (*Stephens und Tsay*, 1990; *Stephens*, 1996; *Zhang et al.*, 1997; *Marshak et al.*, 1999; *Li et al.*, 1999). Die Wolkenabsorption ergibt sich definitionsgemäß als Differenz von Nettostrahlungsflußdichten, die an der Ober- bzw. Untergrenze der betrachteten Schicht (entweder gesamte Atmosphäre oder Wolken-schicht) gemessen oder anderweitig abgeleitet werden. Damit ergibt sich die Wolkenabsorption als kleine Differenz von zwei großen (mit Fehlern behafteten) Werten. Auf diese Weise pflanzen sich unvermeidliche Meßfehler in der ursprünglichen Strahlungsflußdichtemessung stark in die abgeleitete Wolkenabsorption fort. Die großen Unsicherheiten, welche dieses Verfahren der Messung der Wolkenabsorption mit sich bringt, haben tatsächlich generelle Zweifel an der Existenz der Diskrepanzen zwischen berechneter und gemessener Wolkenabsorption ausgelöst. Oft werden unsichere Satellitendaten an der Atmosphärenobergrenze oder Ergebnisse von GCM (Global Circulation Model) Berechnungen mit vereinzelt Bodenstrahlungsmessungen am Unterrand der Atmosphäre zur Ableitung der Wolkenabsorption herangezogen. Dieses Verfahren wurde scharf kritisiert (*Li et al.*, 1995; *Arking et al.*, 1996; *Stephens*, 1996; *Barker und Li*, 1997; *Li et al.*, 1999). Auch wenn Flugzeuge zur Messung der Nettostrahlungsflußdichten über und unter den Wolken benutzt werden ist die so bestimmte Wolkenabsorption in hohem Masse fehlerbehaftet. Dies liegt darin begründet, daß meist getrennt mit zwei Flugzeugen (und damit mit zwei nicht identischen Strahlungssensoren) gemessen wird. Neben der logistisch komplizierten räumlichen Koordination der zwei Flugzeuge unter und über der Wolke ist es schwierig, einen systematischen „bias“ zwischen den beiden getrennten Strahlungsmeßsysteme mit Sicherheit auszuschließen. *Ackerman und Cox* (1981), *Rawlins* (1989), *Hayasaka et al.* (1995), *Marshak et al.* (1997) sowie *Marshak et al.* (1999) entwickeln bzw. benutzen Verfahren, um die Effekte von örtlichen Wolkeninhomogenitäten in den Messungen der Wolkenabsorption mit zwei Flugzeugen über und unter den Wolken zu korrigieren.

Wendisch und Keil (1999) haben eine andere Strategie für Flugzeugmessungen zu dieser Fragestellung des Vergleichs von gemessenen und berechneten Strahlungseigenschaften von Wolken verwendet. Es wurden Vertikalprofile durch die Wolken (anstelle langer horizontaler Flugmuster unter und über den Wolken) mit nur einem Flugzeug (und damit nur einem Strahlungssensor) realisiert. Außerdem wurde der Vergleich zwischen Strahlungsmessungen und –berechnungen nicht über die nur ungenau meßbare Wolkenabsorption durchgeführt, sondern direkt über die auf- und abwärtsgerichteten Strahlungsflußdichten, die nicht so stark

fehlerbehaftet sind wie die Wolkenabsorption. Als Ergebnis wurden Fälle mit guter Übereinstimmung, aber auch Fälle mit starker Diskrepanz zwischen gemessenen und berechneten auf- und abwärtsgerichteten Strahlungsflußdichten festgestellt. Eine Verbindung zwischen der Stärke der Diskrepanz und makro- bzw. mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften konnte nicht zweifelsfrei hergestellt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß derzeit die Existenz des Problems der "überhöhten Wolkenabsorption" international anerkannt und nicht mehr als reines Meßproblem interpretiert wird. Die Ursachen für dieses Phänomen hingegen sind nicht eindeutig geklärt. Auch bei der Wellenlängenabhängigkeit des Problems gibt es keine befriedigenden Antworten. Die bisherigen Strahlungsmessungen waren nicht (oder nur sehr grob in sichtbar und nahes Infrarot) spektral aufgelöst, so daß keine spezifischen Absorber als Verantwortliche für die Diskrepanzen identifiziert werden konnten.

Zitierte Literatur:

- Ackerman, S. A., and S. K. Cox, 1981: Aircraft observations of the shortwave fractional absorptance of non-homogeneous clouds. *J. Appl. Meteorol.*, **20**, 1510-1515.
- Arking, A., 1991: The radiative effect of clouds and their impact on climate. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **72**, 795-813.
- Arking, A., 1996: Absorption of solar energy in the atmosphere: Discrepancy between model and observations. *Science*, **273**, 779-782.
- Arking, A., M.-D. Chou, and W. L. Ridgway, 1996: On the estimation of clouds on atmospheric absorption based on flux observations above and below clouds, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 829-832.
- Arking, A., 1999: Bringing climate models into agreement with observations of atmospheric absorption. *J. Climate*, **12**, 1589-1600.
- Arking, A., M.-D. Chou, and W. L. Ridgway, 1996: On the estimation of clouds on atmospheric absorption based on flux observations above and below clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 829-832.
- Barker, H. W., and Z. Li, 1997: Interpreting shortwave albedo-transmittance plots: True or apparent anomalous absorption. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2023-2026.
- Barker, H. W., J.-J. Morcrette, and G. D. Alexander, 1998: Broadband solar fluxes and heating rates for atmospheres with 3D clouds. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **124**, 1245-1271.
- Cess, R. D., M. H. Zhang, P. Minnis, L. Corsetti, E. G. Dutton, B. W. Forgan, D. P. Garber, W. L. Gates, J. J. Hack, E. F. Harrison, X. Jing, J. T. Kiehl, C. N. Long, J.-J. Morcrette, G. L. Potter, V. Ramanathan, B. Subasilar, C. H. Whitlock, D. F. Young, and Y. Zhou, 1995: Absorption of solar radiation by clouds: Observations versus models. *Science*, **267**, 496-499.
- Cess, R. D., M. H. Zhang, Y. Zhou, X. Jing, and V. Dvortsov, 1996: Absorption of solar radiation by clouds: Interpretations of satellite, surface, and aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, **101**, 23299-23309.
- Chou, M.-D., W. Zhao, and S.-H. Chou, 1998: Radiation budgets and cloud radiative forcing in the Pacific warm pool during TOGA COARE. *J. Geophys. Res.*, **103**, 16967-16977.
- Chylek, P., G. B. Lesins, G. Videen, J. G. D. Wong, R. G. Pinnick, D. Ngo, and J. D. Klett, 1996: Black carbon and absorption of solar radiation by clouds. *J. Geophys. Res.*, **101**, 23365-23371.
- Chylek, P., G. Videen, and N. Ngo, 1998: Effect of air bubbles on absorption of solar radiation by water droplets. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 340-343.
- Evans, K. F., 1998: The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 429-446.
- Francis, P. N., J. P. Taylor, P. Hignett, and A. Slingo, 1997: On the question of enhanced absorption of solar radiation by clouds. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **123**, 419-434.
- Fritz, S., 1951: Solar radiant energy. in *Compendium of Meteorology*, edited by T. F. Malone, pp. 14-29, John Wiley, New York.
- Hayasaka, T., Kikuchi, N., and Tanaka, M., 1995: Absorption of solar radiation by Stratocumulus clouds: aircraft measurements and theoretical calculations. *J. Appl. Meteorol.*, **34**, 1047-1055.
- Heintzenberg, J., and M. Wendisch, 1996: On the sensitivity of cloud albedo to the partitioning of particulate absorbers in cloudy air. *Contr. Atmos. Phys.*, **69**, 491-499.
- Imre, D. G., E. H. Abramson, and P. H. Daum, 1996: Quantifying cloud-induced shortwave absorption: An examination of uncertainties and of recent arguments for large excess absorption. *J. Appl. Meteorol.*, **35**, 1991-2010.
- Kiehl, J. T., Hack, J. H., Zhang, M. H., and Cess, R. D., 1995: Sensitivity of a GCM climate to enhanced shortwave cloud absorption. *J. Climate*, **8**, 2200-2212.
- Li, Z., H. W. Barker, and L. Moreau, 1995: The variable effect of clouds on atmospheric absorption of solar radiation. *Nature*, **376**, 486-490.

- Li, Z., 1998: Influence of absorbing aerosols on the interference of solar surface radiation budget and cloud absorption. *J. Climate*, **11**, 5-17.
- Li, Z., A. P. Trishchenko, H. W. Barker, G. L. Stephens, and P. Partain, 1999: Analyses of Atmospheric Radiation Measurement (ARM) program's Enhanced Shortwave Experiment (ARESE) multiple data sets for studying cloud absorption. *J. Geophys. Res.*, **104**, 19127-19134.
- Lubin, D., J.-P. Chen, P. Pilewskie, and F. P. J. Valero, 1996: Microphysical examination of excess cloud absorption in the tropical atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **101**, 16961-16972.
- Marshak, A., A. Davis, W. Wiscombe, and R. Cahalan, 1997: Inhomogeneity effects of cloud shortwave absorption measurements: Two aircraft simulations. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16619-16637.
- Marshak, A., A. Davis, W. Wiscombe, W. Ridgway, and R. Cahalan, 1998: Biases in shortwave column absorption in the presence of fractal clouds. *J. Climate*, **11**, 431-446.
- Marshak, A., W. Wiscombe, A. Davis, L. Oreopoulos, and R. Cahalan, 1999: On the removal of the effect of horizontal fluxes in two-aircraft measurements of cloud absorption. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **125**, 2153-2170.
- Müller, D., M. Wendisch, J. Heintzenberg, and D. Schell, 2000: Concept and first tests of a new airborne spectrometer system for solar radiation measurements. Accepted for presentation at the 13th International Conference on Clouds and Precipitation, 14-18 August 2000, Reno, USA.
- O'Hirok, W., and C. Gautier, 1998: A three-dimensional radiative transfer model to investigate the solar radiation within a cloudy atmosphere. Part I: Spatial effects. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 2162-2179.
- Pilewskie, P., and Valero, P. J., 1995: Direct observations of excess solar absorption by clouds. *Science*, **267**, 1626-1629.
- Ramanathan, V., B. Subasilar, G. J. Zhang, W. Conant, R. D. Cess, J. T. Kiehl, H. Grassl, and L. Shi, 1995: Warm pool heat budget and shortwave cloud forcing: A missing physics? *Science*, **267**, 499-503.
- Rawlins, F., 1989: Aircraft measurements of solar absorption by broken cloud fields: A case study. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **115**, 365-382.
- Slingo, A., S. Nicholls, and J. Schmetz, 1982: Aircraft observations of marine stratocumulus during JASIN. *ibid.*, **108**, 833-856.
- Somerville, C. J., 1985: Clouds and climate regulation. *Nature*, **315**, 713-714.
- Stephens, G. L., 1996: How much solar radiation do clouds absorb? *Science*, **271**, 1131-1133.
- Stephens, G. L., and S.-C. Tsay, 1990: On the cloud absorption anomaly. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **116**, 671-704.
- Taylor, J. P., Edwards, J. M., Glew, M. D., Hignett, P., and Slingo, A., 1996: Studies with a flexible new radiation code. II: Comparisons with aircraft short-wave observations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **122**, 839-861.
- Trautmann, T., I. Podgorny, J. Landgraf, and P. J. Crutzen, 1999: Actinic fluxes and photodissociation coefficients in cloud fields embedded in realistic atmospheres. *J. Geophys. Res.*, **104**, 30173-30192.
- Valero, F. P. J., R. D. Cess, M. Zhang, S. K. Pope, A. Bucholtz, B. C. Bush, and J. Vitko Jr., 1997: Absorption of solar radiation by the cloudy atmosphere: Interpretation of collocated aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, **102**, 29917-29928.
- Valero, F. P. J., P. Minnis, S. K. Pope, A. Bucholtz, B. C. Bush, D. R. Doelling, W. L. Smith Jr., and X. Dong, 2000: Absorption of solar radiation by the atmosphere as determined using satellite, aircraft, and surface data during the Atmospheric Radiation Measurement Enhanced Shortwave Experiment (ARESE). *J. Geophys. Res.*, **105**, 4743-4758.
- Wendisch, M., and A. Keil, 1999: Discrepancy between measured and modeled solar and UV radiation within polluted boundary layer clouds. *J. Geophys. Res.*, **104**, 27373-27385.
- Wiscombe, W. J., 1995: An absorbing mystery. *Nature*, **376**, 466-467.
- Wiscombe, W. J., R. M. Welch, and W. W. Hall, 1984: The effect of very large drops on cloud absorption, 1, Parcel models. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1336-1355.
- Zender, C. S., B. Bush, S. K. Pope, A. Bucholtz, W. D. Collins, J. T. Kiehl, P. J. Valero, and J. Vitko Jr., 1997: Atmospheric absorption during the atmospheric radiation measurement (ARM) enhanced shortwave experiment (ARESE). *J. Geophys. Res.*, **102**, 29901-29915.
- Zhang, M., R. D. Cess, and X. Jing, 1997: Concerning the interpretation of enhanced cloud shortwave absorption using monthly-mean Earth Radiation Budget Experiment/Global Energy Balance Archive measurements. *J. Geophys. Res.*, **102**, 25899-25905.

2.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers

Der Antragsteller ist Leiter der Arbeitsgruppe 'Aerosol, Wolken und Strahlung' am IfT. Seit 1988 befaßt sich der Antragsteller mit Messungen zu den mikrophysikalisch-optischen Eigenschaften von Aereosolpartikeln und Wolkentropfen sowie entsprechenden Strahlungsmessungen und Modellberechnungen. Während seiner Promotion von 1988 bis 1992 an der Universität Leipzig hat der Antragsteller ein Verfahren entwickelt zur Ableitung des Brechungsindex und der Größenverteilung von Aerosolpartikeln mit Hilfe von bodengebundenen Messungen der direkten und gestreuten Sonnenstrahlung in einer wolkenlosen Atmosphäre. Seit 1993 beschäftigt sich der Antragsteller am IfT mit

Flugzeugmessungen von Aerosol-, Wolken- und Strahlungseigenschaften. Dabei geht es im wesentlichen um zwei Fragestellungen: (a) die Wechselwirkung zwischen Aerosolpartikeln und solarer Strahlung in der wolkenlosen Atmosphäre und die (b) den Einfluß von erhöhten Aerosolkonzentrationen auf die mikrophysikalischen und Strahlungseigenschaften von stratiformen Grenzschichtwolken. Zu diesen beiden Themen wurden innerhalb der letzten Jahre mehrere IfT-interne Flugzeugmeßkampagnen im Raum Mönchengladbach, Leipzig und Kamenz (bei Dresden) durchgeführt. Weiterhin hat der Antragsteller an mehreren größeren nationalen (BROCKEX 1994, NORDEX 1996, LACE 1998) und internationalen (JABO 1989, GDF 1993, CHEMDROP 1994, GDF 1995, STAAARTE-MED 1998, NASA 1998, CLACE 2000) Feldexperimenten teilgenommen. Zur Interpretation der Messungen werden vom Antragsteller detaillierte, eindimensionale Strahlungsübertragungsmodelle genutzt und auf die speziellen Anforderungen der Flugzeugmessungen hin angepaßt. Derzeit ist der Antragsteller an einem internationalen Vergleich von Strahlungsübertragungsmodellen beteiligt (ICRCCM). Einige ausgewählte und für das beantragte Vorhaben relevante begutachtete Veröffentlichungen des Antragstellers aus den letzten 3 Jahren sind nachfolgend aufgelistet.

- Wendisch, M., S. Mertes, A. Ruggaber, and T. Nakajima, 1996: Vertical profiles of aerosol and radiation and the influence of a temperature inversion: Measurements and radiative transfer calculations. *J. Appl. Meteorol.*, **35**, 10, 1703-1715.
- Heintzenberg, J., and M. Wendisch, 1996: On the sensitivity of cloud albedo to the partitioning of particulate absorbers in cloudy air. *Contr. Atmos. Phys.*, **69**, 4, 491-499.
- Wendisch, M., A. Keil, and A. V. Korolev, 1996: FSSP characterization with monodisperse water droplets. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **13**, 1152-1165.
- Hallberg, A., W. Wobrock, A. I. Flossmann, K. N. Bower, K. J. Noone, A. Wiedensohler, H.-C. Hansson, M. Wendisch, A. Berner, C. Kruisz, P. Laj, M. C. Facchini, S. Fuzzi, and B. G. Arends, 1997: Microphysics of clouds: Model vs measurements. *Atmos. Environ.*, **31**, 2453-2462.
- Mertes, S., and M. Wendisch, 1997: Microphysical and optical features of polluted cooling tower clouds. *Atmos. Res.*, **44**, 271-292.
- J. Heintzenberg, R. J. Charlson, A. D. Clarke, C. Liousse, V. Ramaswamy, K. P. Shine, M. Wendisch, and G. Helas, 1997: Measurements and modelling of aerosol single-scattering albedo: Progress, problems, and prospects. *Contr. Atmos. Phys.*, **70**, 249-263.
- Heintzenberg, J., M. Wendisch, B. Yuskiewicz, D. Orsini, A. Wiedensohler, F. Stratmann, G. Frank, B. G. Martinsson, D. Schell, S. Fuzzi, and G. Orsini, 1998: Characteristics of haze, mist and fog. *Contr. Atmos. Phys.*, **71**, 21-31.
- Wendisch, M., S. Mertes, J. Heintzenberg, D. Schell, W. Wobrock, G. Frank, B. Martinsson, S. Fuzzi, G. Orsi, G. Kos, and A. Berner, 1998: Drop size distribution and LWC in Po valley fog. *Contr. Atmos. Phys.* **71**, 87-100.
- Wendisch, M., 1998: A quantitative comparison of ground-based FSSP and PVM measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 887-900.
- Martinsson, B. G., Frank, G., Cederfelt, S. I., Swietlicki, E., Berg, O. H., Zhou, J., Bower, K. N., Bradbury, C., Birmili, W., Stratmann, F., Wendisch, M., Wiedensohler, A., and Yuskiewicz, B., 1999: Droplet nucleation and growth in orographic clouds in relation to the aerosol population. *Atmos. Res.*, **50**, 289-315.
- Wendisch, M., and A. Keil, 1999: Discrepancy between measured and modeled solar and UV radiation within polluted boundary layer clouds. *J. Geophys. Res.*, **104**, 27373-27385.
- Früh, B., T. Trautmann, M. Wendisch, and A. Keil, 2000: Comparison of observed and simulated NO₂ photodissociation frequencies in a cloudless atmosphere and in continental boundary layer clouds. *J. Geophys. Res.*, **105**, 9843-9857.

Zu den neuen Gerätekomponenten FAST FSSP und Albedometer (s. Abschnitt 3.1.1) sind Veröffentlichungen in begutachteten Zeitschriften in Vorbereitung. Als aktuelle Referenzen sind nachfolgend zwei ausführliche Zusammenfassungen für die internationale Wolkenkonferenz in Reno (USA) aufgelistet.

- Schmidt, S., M. Wendisch, and J.-L. Brenguier, 2000: Comparison of Fast FSSP, PVM and King probe microphysical measurements during ACE 2. Accepted for presentation at the 13th International Conference on Clouds and Precipitation, 14-18 August 2000, Reno, USA.
- Müller, D., M. Wendisch, J. Heintzenberg, and D. Schell, 2000: Concept and first tests of a new airborne spectrometer system for solar radiation measurements. Accepted for presentation at the 13th International Conference on Clouds and Precipitation, 14-18 August 2000, Reno, USA.

3. Ausführliche Beschreibung des Arbeitsplans

3.1 Vorhabensbezogene Planung

Der Antragsteller koordiniert das ‚working package 2100‘ (Experiment BBC) innerhalb des Verbundprojektes 4DWOLKEN. Die Aufgaben dieses ‚working packages‘ beinhalten die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des geplanten Feldexperimentes in Cabauw. Bei diesem Experiment werden von den Projektpartnern Messungen mit mehreren Flugzeugen sowie bodengebundene Messungen durchgeführt. Dies erfordert eine enge Koordination zwischen den Partnern innerhalb des Projektverbundes 4DWOLKEN als auch mit einer abgestimmten Kooperation mit CLIWA-NET. Der Antragsteller ist für diese Koordination verantwortlich. Wechselwirkungen innerhalb des ‚working package 2100‘ sowie mit den anderen ‚working packages‘ sind im Gesamtantrag zu 4DWOLKEN diskutiert. Im folgenden wird der spezielle Arbeitsplan des Antragstellers erläutert.

Der vorliegende Projektvorschlag beinhaltet im wesentlichen *in-situ* Messungen und entsprechende Strahlungsübertragungsrechnungen. Zu den Messungen gehören flugzeuggetragene mikrophysikalisch-optische (Aerosolpartikel und Wolkentropfen), Strahlungs- und meteorologische Messungen sowie bodengestützte Strahlungsmessungen. Ergänzend dazu und auf der Basis der Messungen sollen detaillierten eindimensionalen Strahlungsübertragungsrechnungen durchgeführt werden.

3.1.1 Flugzeuggetragene Messungen

Die Messungen sollen gekoppelt werden mit Aktivitäten im Rahmen des EU-finanzierten Projektes CLIWA-NET. Dieses Projekt beinhaltet boden- und satellitengebundene Messungen des Flüssigwasserpfad (LWP) innerhalb eines europaweiten Meßnetzes. Die in CLIWA-NET einbezogenen passiven Mikrowellen- und Radarmessungen liefern die mehrdimensionale Strukturinformation für die Wolken, wobei die *in-situ* Flugzeugmessungen auch zur Kalibrierung und Verifikation dieser Daten genutzt werden sollen. Während CLIWA-NET (Laufzeit 2000-2003) wird es drei Intensivmeßphasen geben. Es ist vorgesehen, sich mit den Flugzeugmessungen an der letzten dieser Kampagnen, die im August/September 2001 stattfinden wird, zu beteiligen. Bei diesem Feldexperiment sollen alle in das CLIWA-NET einbezogenen Instrumente der 14 beteiligten europäischen Partner (Mikrowellen Sensoren, 94 GHz Wolkenradar, IR Radiometer, Ceilometer) an einem Meßplatz in Holland (Cabauw) für mehrere Wochen parallel betrieben werden.

Im einzelnen beinhalten die *in-situ* Flugzeugmessungen folgende Parameter:

(i) Flugzeuggetragene mikrophysikalisch-optische Messungen (Aerosolpartikel und Wolkentropfen)

Diese Messungen sollen zur punktwisen Verifikation der 94 GHz Radarmessungen (4DWOLKEN-Projektpartner GKSS Forschungszentrum Geesthacht) und der passiven Mikrowellenmessungen (4DWOLKEN-Projektpartner Universität Bonn) sowie der Ergebnisse der wolkenauflösenden Atmosphärenmodelle genutzt werden. Weiterhin werden diese Daten benötigt als Eingabewerte für die mehrdimensionalen Strahlungsübertragungsrechnungen (4DWOLKEN-Projektpartner IfM Kiel und IPA Mainz).

Die flugzeuggetragenen *mikrophysikalisch-optischen* Messungen umfassen:

- Aerosolpartikel: Messung der Größenverteilung im optisch relevanten Größenbereich zwischen 0.1 und 10 μm Partikeldurchmesser, Messung des Volumenstreuoeffizienten bei drei Wellenlängen (450, 550, 700 nm), des Partikelabsorptionskoeffizienten bei einer Wellenlänge (567 nm) sowie der Partikelgesamtkonzentration in zwei Größenbereichen (ab 3 nm und ab 10 nm Partikeldurchmesser). Kommerziell erhältliche Geräte werden (in modifizierter Form) verwendet.

- Wolkentropfen: Messung der Größenverteilung ($< 50 \mu\text{m}$ Tropfendurchmesser), des Flüssigwassergehaltes (LWC) und des effektiven Tropfenradius (R_{eff}). Für die Messung der Größenverteilung der Tropfen wird das FAST FSSP (Forward Scattering Spectrometer Probe), eine verbesserte Version des kommerziell erhältlichen FSSP benutzt. LWC und R_{eff} werden mit einem weiteren kommerziellen Gerät (PVM, Particle Volume Monitor) gemessen. Für die Charakterisierung der Wolkentropfen mit einem Durchmesser größer $50 \mu\text{m}$ wird in Zusammenarbeit mit dem GKSS Forschungszentrum Geesthacht ein Gerät vom Typ OAP (Optical Array Probe) eingesetzt.

In Tabelle 1 sind die entsprechenden flugzeuggetragenen Meßgeräte für die mikrophysikalisch-optischen Parameter zusammengefaßt.

Tabelle 1: Flugzeuggetragene mikrophysikalisch-optische Meßgeräte:

Instrument	Spezifikation	Meßgröße
• <u>Aerosolpartikel</u>		
PCASP-X ¹	$d_p = 0.1-10 \mu\text{m}$	Größenverteilung
Nephelometer ²	$I = 450, 550, 700 \text{ nm}$	Volumenstreuoeffizient
PSAP ³	$I = 567 \text{ nm}$	Volumenabsorptionskoeffizient
CPC 3010 ⁴	$d_p > 0.01 \mu\text{m}$	Gesamtkonzentration
CPC 3025 ⁴	$d_p > 3 \text{ nm}$	Gesamtkonzentration
• <u>Wolkentropfen</u>		
FAST FSSP ⁵	$d_b < 50 \mu\text{m}$	Größenverteilung
PVM-100A ⁶	$< 10 \text{ g m}^{-3}, 2-50 \mu\text{m}$	LWC, R_{eff}
OAP ⁷	$d_b > 50 \mu\text{m}$	Größenverteilung

mit: d_p Partikel-Durchmesser, I Wellenlänge, d_b Tropfen-Durchmesser, LWC Liquid Water Content (Flüssigwassergehalt), R_{eff} Effektiver Tropfenradius.

(ii) Flugzeuggetragene Messung von Strahlungsgrößen

Die Strahlungsmessungen dienen der Verifikation von Ergebnissen der geplanten mehrdimensionalen Strahlungsübertragungsrechnungen (4DWOLKEN-Projektpartner IfM Kiel und IPA Mainz). Zusätzlich sollen Satellitenmessungen verifiziert werden (4DWOLKEN-Projektpartner Universität Dresden). Es werden auf- und abwärtsgerichteten spektrale Strahlungsflußdichten vom Flugzeug aus mit einer spektralen Auflösung $< 2.4 \text{ nm}$ in einem Wellenlängenbereich zwischen 400 bis 900 nm gemessen. Dieses Meßsystem wird im folgenden als **Albedometer** bezeichnet.

¹ PCASP-X: Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe, Hergestellt von Particle Measuring Systems, Inc., Boulder, CO, USA.

² Hergestellt von TSI, Inc., St. Paul, MN, USA.

³ PSAP: Particle Soot/Absorption Photometer, Hergestellt von Radiance Research, Seattle, WA, USA.

⁴ CPC: Condensation Particle Counter, Hergestellt von TSI, Inc., St. Paul, MN, USA.

⁵ FAST FSSP: Schnelles FSSP (Forward Scattering Spectrometer Probe), Entwickelt von Meteo France, Toulouse, in modifizierter Form vom IfT adaptiert.

⁶ PVM: Particle Volume Monitor, Hergestellt von Gerber Scientific, Inc., Reston, VA, USA.

⁷ OAP: Optical Array Probe, Hergestellt von Particle Measuring Systems, Inc., Boulder, CO, USA.

Strahlungsflußdichten sind per Definition auf eine horizontale Empfängerfläche bezogen. Schon kleine Abweichungen der Meßempfängerfläche von der Horizontalen bewirken drastische Fehler in der gemessenen Strahlungsflußdichte. So bewirkt eine Winkelabweichungen von 0.5 Grad von der Horizontalen schon eine Änderung der gemessenen Strahlungsleistung von mehr als 2 % bei Sonnenzenitwinkeln um 70 Grad (*Müller et al.*, 2000). Bisher wurde diese Flugzeuglagewinkelabhängigkeit nach dem Flug mit Hilfe der avionischen Lagewinkeldaten über entsprechende Algorithmen korrigiert. Die damit erreichbare Genauigkeit in der Strahlungsflußdichtemessung liegt in der Größenordnung von $\approx 8\%$. Dies ist ausreichend zum eindeutigen Nachweis der Existenz von Diskrepanzen zwischen gemessenen und berechneten Strahlungsflußdichten und damit dem Ausschluß von Meßungenauigkeiten als Ursache für dieses des Problem (*Wendisch und Keil*, 1999). Für die Ableitung der Wolkenabsorption und eine tiefgehende Ursachenforschung ist diese Meßungenauigkeit jedoch nicht akzeptabel. Zur signifikanten Erhöhung der Meßgenauigkeit für die Strahlungsflußdichten werden im beantragten Projekt beide Gerätekomponenten des Albedometers (auf- und abwärtsgerichtet) während des Fluges präzise horizontal lagestabilisiert, wodurch die unsichere Nachbehandlung und Korrektur der Daten nach dem Flug entfällt. Die dazu notwendige aktive Lagestabilisierung wurde 1999 in Zusammenarbeit mit der Firma *enviscope* GmbH entwickelt und getestet. Die Lagestabilisierung besteht im wesentlichen aus einem sehr schnellen und genauen inertiales Lagereferenzsystem, welches aus drei faseroptischen Kreisel aufgebaut ist, sowie aus einem servogetriebenen 2-D Kippmechanismus zur aktiven Nachführung der Sensoren. Über die Drehratenmessung (Strap-Down-Methode) können der Neige- und Wankwinkel (pitch und roll) des Flugzeuges in Bezug auf die Horizontale präzise bestimmt werden. Durch die Integration von Drehraten zu den gesuchten Winkeln unterliegen diese Systeme stets einer gewissen Drift, die durch Meßrauschen und stochastische Restfehler der Drehratensensoren verursacht wird. Die daraus resultierenden Meßfehler nehmen mit zunehmender Meßdauer zu. Zur Reduktion dieser Driftfehler wird eine externe Stützung über GPS und Beschleunigungssensoren verwendet. Aus der Kombination von Drehratenmessung und externer Stützung sind zeitlich stabile und sehr genaue pitch- und roll-Winkelmessungen möglich. Auf der Basis dieser Messungen werden beide Meßköpfe des Albedometers mit Hilfe von Servomotoren zum Ausgleich der Flugzeugbewegung aktiv horizontal nachgeführt. In Laborversuchen und einer Flugzeugmeßkampagne des IfT im November 1999 konnte nachgewiesen werden, daß die Lagestabilisierung unter stabilen Flugzeugbedingungen mit einer Genauigkeit besser 0.2 Grad arbeitet, was einer geforderten Genauigkeit von besser 1% (bei 70 Grad Sonnenzenitdistanz) für die resultierenden Strahlungsflußdichten entspricht (*Müller et al.*, 2000).

Die beiden Sensorsysteme des Albedometers bestehen aus zwei spektral hochauflösenden Gitterspektrometern (jeweils für die getrennte Messung der auf- und abwärtsgerichteten Strahlungsflußdichten) mit jeweils einer Diodenzeile (1024 Pixel) als Detektor mit einer Wellenlängenauflösung von besser 2.4 nm. Damit soll die Wellenlängenabhängigkeit des Phänomens der „überhöhten Absorption in Wolken“ untersucht werden. Die Spektrometersysteme werden im Labor mit von der PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig) zertifizierten Kalibrierlampen geeicht. Die Kosinus-Charakteristik der Meßköpfe wird ebenfalls im Labor bestimmt und in die Bestimmung der Strahlungsflußdichten einbezogen. Diese Spektrometersysteme wurden ebenfalls im November 1999 erfolgreich im Flugzeugeinsatz getestet.

(iii) Flugzeuggetragene Messung von meteorologischen Parametern

Zusätzlich zu (i) und (ii) werden statischer Luftdruck (Pitot Sonde), Lufttemperatur und Relative Luftfeuchte (Vaisala Sensoren) sowie avionische Daten (aus der aktiven Lagestabilisierung) während der Flüge aufgezeichnet.

Für die Flugzeugmessungen steht eine zweimotorige Partenavia P68B zur Verfügung. Das Flugzeug wird über die Firma *enviscope* GmbH von der *Rheinbraun* AG gechartert. Die

enviscope GmbH übernimmt die logistische Planung sowie die Ausrüstung des Flugzeuges in Zusammenarbeit mit dem IfT. Ein verbindliches Angebot von *enviscope* zu den Flugzeugkosten für den geplanten Experimenteinsatz (August/September 2001) liegt vor. Die Partenavia kann mit der geplanten Ausrüstung bis zu 4.5 km Höhe über Grund erreichen. Die mittlere Fluggeschwindigkeit beträgt 70 m s^{-1} . Es besteht seit nunmehr fünf Jahren eine zuverlässige Zusammenarbeit zwischen dem IfT und *enviscope* bzw. *Rheinbraun*.

Als bevorzugte Flugmuster werden zum einen vertikale Auf- und Abstiege durch die Wolken, und zum anderen horizontale Flugmuster unter, in und über den Wolken geplant.

3.1.2 Bodengebundene Strahlungsmessungen

Am Boden wird ein zu den beiden Komponenten (auf- und abwärtsblickend) des Flugzeugalbedometers identisches Spektrometersystem zur Messung der abwärtsgerichteten spektralen Strahlungsflußdichten verwendet. Diese Daten dienen dem Anschluß an die Flugzeugmessungen und werden ergänzt durch die auf dem Meßfeld von Cabauw Routine-Strahlungsmessungen. Zusätzlich werden am Boden spektrale Messungen mit einem Sonnenphotometer durchgeführt. Bei durchbrochener Bewölkung soll das Photometer zur Abschätzung der spektralen optischen Dicke der Aerosolpartikel (in den Wolkenlücken) sowie der Wolkentropfen (Wolken vor der Sonne) genutzt werden.

3.1.3 Eindimensionale Strahlungsübertragungsrechnungen

Ergänzend zu den Messungen sollen Berechnungen der vom Flugzeug aus (sowie der am Boden) gemessenen Strahlungsgrößen auf der Basis der gemessenen mikrophysikalischen (Aerosolpartikel und Wolkentropfen) und meteorologischen Größen durchgeführt werden. Dabei wird sich zeigen ob und wie stark und unter welchen Bedingungen die gemessenen Strahlungsgrößen von den berechneten abweichen.

Für die Modellrechnungen innerhalb dieses Projektes wird ein Strahlungsübertragungsmodell basierend auf der 'Matrix Operator Method' nach *Nakajima und Tanaka* (1986, 1988) verwendet. Das Modell ist ein spektrales, eindimensionales Säulenmodell, welches zur Berechnung von Strahlungsflußdichten oder Strahldichten aus beliebig vorgegeben Raumrichtungen im Wellenlängenbereich von 0.2 bis $200 \mu\text{m}$ geeignet ist. Es bestehen keine Beschränkungen hinsichtlich der optischen Dicke, welche vom Modell behandelt werden kann, d.h. das Modell ist auch zur Berechnung von Strahlungsfeldern innerhalb von Wolken mit hoher optischer Dicke geeignet.

Für den Einbau der vom Flugzeug gemessenen Daten wird die Höhenauflösung des Modells auf 20 m festgesetzt. Für die spektralen Rechenergebnisse für jede einzelne Wellenlänge wird im Modell eine 'k-distribution' Wichtung mit zwei Nachbarstützstellen benutzt (*Fu und Liou*, 1992),

Das Strahlungsübertragungsmodell erfordert die Bereitstellung der Vertikalprofile von meteorologischer Daten (statischer Luftdruck, Lufttemperatur, Relative Luftfeuchte), Spurengaskonzentrationen (insbesondere Ozon) und mikrophysikalischer Eingabewerte mit einer vertikalen Auflösung von 20 m. Dazu werden sowohl die Flugzeugmessungen als auch die von CLIWA-NET während der Intensivmeßphase in Cabauw geplanten Radiosondenaufstiege (im Abstand von drei Stunden) verwendet. Die mikrophysikalischen Eingangsdaten für das Modell beinhalten Parameter, welche die Größenverteilung der Aerosolpartikel bzw. der Wolkentropfen sowie deren Brechungsindex charakterisieren. Zu diesem Zwecke werden die vom Flugzeug aus gemessenen Größenverteilungen für die Aerosolpartikel und Wolkentropfen an logarithmische Normalverteilungen angepaßt. Die

Parameter der logarithmischen Normalverteilung sind durch den mittleren Modenradius (Volumenverteilung), die geometrische Standardabweichung der Größenverteilung sowie die Volumenkonzentration (für Aerosolpartikel) bzw. den Flüssigwassergehalt *LWC* (für Wolkentropfen) gegeben.

Fu, Q., and K. N. Liou, 1992: On the correlated *k*-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139-2156.

Nakajima, T., and M. Tanaka, 1986: Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane parallel scattering atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer*, **5**, 13-21.

Nakajima, T., and M. Tanaka, 1988: Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using a truncation approximation. *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer*, **40**, 51- 69.

3.1.4 Verfügbarmachung der Daten

Während der dreijährigen Laufzeit für das beantragte Projekt werden die abgesicherten und konsistenten Meßdaten (Flugzeug und Boden) für die anderen an 4DWOLKEN (Gesamtlaufzeit fünf Jahre) beteiligten Projektpartner frei verfügbar gemacht.

3.2 Meilensteinplanung

Als Termin für den Projektbeginn wird der 1.10.2000 beantragt. Dieser Termin ist zeitkritisch, weil ansonsten die Vorbereitung des für August/September 2001 geplanten Feldexperimentes nicht mit der notwendigen Sorgfalt erfolgen kann. Der Termin für das Feldexperiment ist durch die Kopplung von 4DWOLKEN mit CLIWA-NET vorgegeben und kann nicht verschoben werden. Deshalb wird ein Projektbeginn am 1.10.2000 als vordringlich angesehen.

Erstes Förderjahr

Das erste Förderjahr wird hauptsächlich durch die Vorbereitung und (gegen Ende) durch das Feldexperiment in Holland (Cabauw) bestimmt. Dafür ist eine intensive Abstimmung zwischen den bei 4DWOLKEN beteiligten Projektpartnern aber auch mit den Teilnehmern von CLIWA-NET notwendig. Absprachen müssen getroffen werden bzgl. der Meßstrategie, der Datenauswertung und des späteren Datenvergleichs und -austausches.

- Auf einem **ersten Arbeitstreffen** (Kickoff) sind die angestrebten Messungen aller 4DWOLKEN-Projektpartner darzustellen und die Zusammenführung der gewonnenen Daten mit denen der anderen Teilnehmer abzustimmen. Eventuelle, noch vorhandene Lücken in der Meßstrategie sind aufzuzeigen und Möglichkeiten zu ihrer Schließung sind zu diskutieren.
- Das Meßflugzeug muß für seinen Einsatz während des Feldexperimentes vorbereitet werden. Dazu gehören auch bundeslufffahrttechnische Zulassungen von veränderten Außenlasten (Albedometer).
- Die verwendeten Geräte müssen in mehrere Meßracks integriert und getestet werden. Dies schließt sorgfältige Kalibrierungen und Meßkopfcharakterisierung (Kosinus-Charakteristik) im Labor ein. Weiterhin müssen die Datenerfassungsroutinen für alle Komponenten des komplexen Meßsystems erstellt bzw. angepaßt werden.
- Ein **zweites Arbeitstreffen** am Experimentort zur Vorbereitung der Kampagne wird durchgeführt (gemeinsam mit den CLIVA-NET Partnern).
- Die logistische Planung der Flugzeugmeßkampagne einschließlich der Vorbereitung der notwendigen Luftgebietssperrung, die zwingend für die geplanten Wolkenflüge unter Instrumentenflugbedingungen notwendig ist, muß realisiert werden.
- Am Ende des ersten Projektjahres steht die Durchführung der Meßkampagne in Holland (Cabauw).

Zweites Förderjahr

Im zweiten Förderjahr liegt der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Auswertung der im Feldexperiment gewonnenen Daten und der Bereitstellung dieser für die anderen Projektteilnehmer. Weiterhin sollen eindimensionalen Strahlungsübertragungs-rechnungen auf der Grundlage der Messungen realisiert werden.

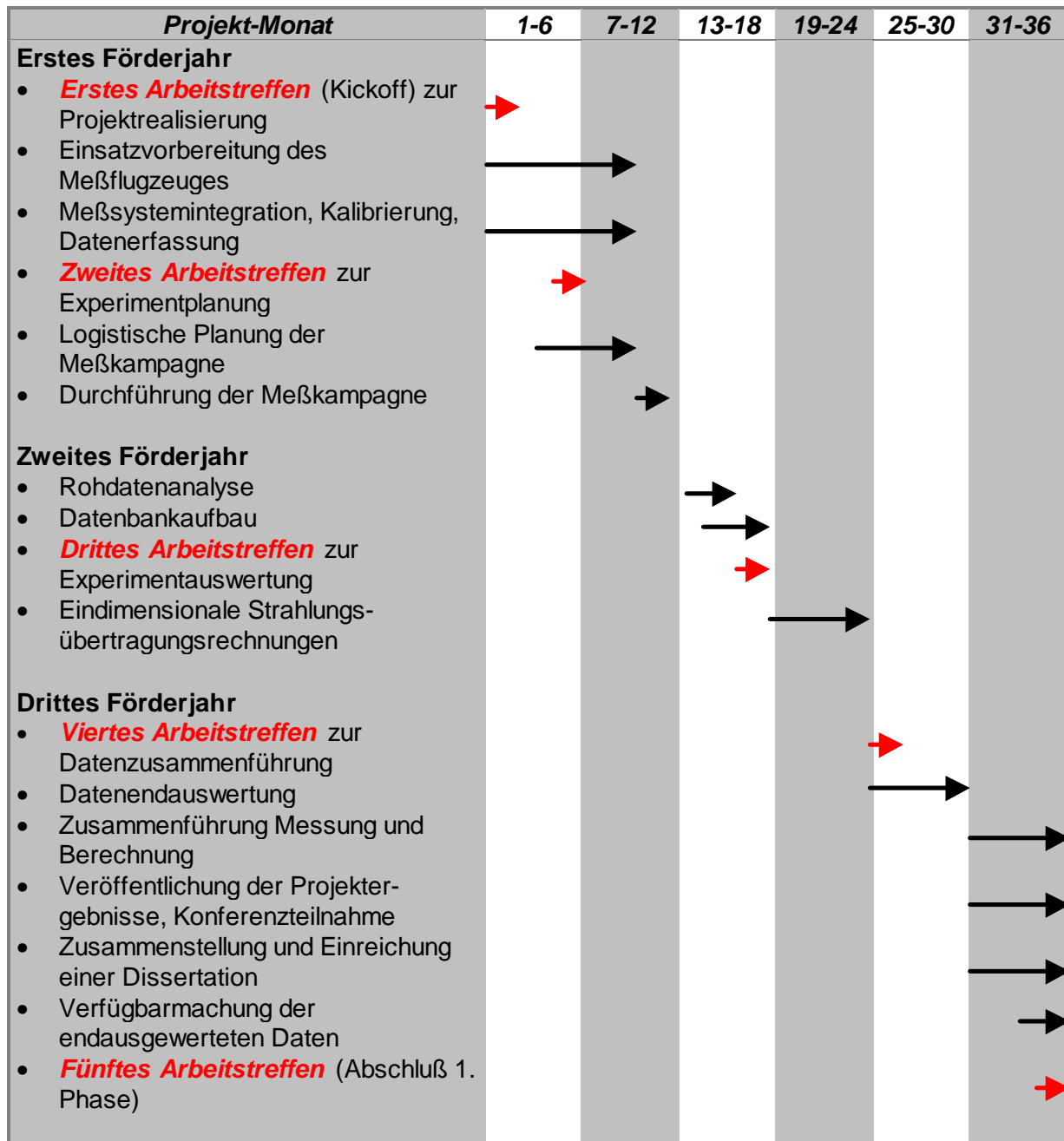
- Die Rohdaten werden mit entsprechenden Auswerteroutinen in physikalische Einheiten umgerechnet und auf Konsistenz und Verlässlichkeit geprüft.
- Es wird eine Datenbank errichtet, die für die an 4DWOLKEN beteiligten Gruppen verfügbar gemacht wird. In dieser gemeinsamen Datenbank werden entsprechend den zwei bevorzugten Flugmustern (Vertikale Abstiege sowie horizontale Flüge in verschiedenen Höhen) spätestens sechs Monate nach der Feldmeßkampagne die meteorologischen, mikrophysikalisch-optischen und Strahlungsdaten abgespeichert. Die zeitliche Auflösung der Messungen wird allgemein 1 Hz betragen. Wenn möglich werden auf spezielle Anforderung hin die Messungen mit einer höheren zeitlichen Auflösung bereitgestellt.
- Ein **drittes Arbeitstreffen** zur Auswertung der Meßkampagne wird durchgeführt.
- Im zweiten Teil dieses Förderjahres sollen die eindimensionalen Strahlungsübertragungsrechnungen auf der Grundlage der gemessenen meteorologischen und mikrophysikalischen Messungen erfolgen. Dabei wird sich zeigen, ob bzw. wie stark die gemessenen spektralen auf- und abwärtsgerichteten Strahlungsflußdichten mit den Berechnungen übereinstimmen.

Drittes Förderjahr

Im dritten Jahr der Förderung wird die Endauswertung der Daten, die Interpretation und Publikation der gewonnenen Ergebnisse im Mittelpunkt der Arbeiten stehen.

- Ein **viertes Arbeitstreffen** zur Zusammenführung der Experimentergebnisse wird realisiert. Veröffentlichungen werden geplant.
- Die Endauswertung der Daten wird durchgeführt. Dabei ist besonders auf die Kombination der Messungen und Berechnungen mit allen an 4DWOLKEN beteiligten Gruppen zu achten.
- Die Zusammenführung von Messungen und Berechnungen erfolgt. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, wie stark die Abweichungen zwischen Strahlungsmessungen und –berechnungen unter Verwendung eines eindimensionalen Strahlungsübertragungsmodells sind und ob der Grad der Abweichung mit bestimmten makro- (z.B. geometrische Wolkendicke) und mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften (z.B. Stärke der Wolkeninhomogenität) korreliert ist.
- Die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse werden in einer begutachteten, internationalen Zeitschrift zur Veröffentlichung eingereicht. Eine Konferenzteilnahme zur Präsentation der Projektergebnisse wird realisiert.
- Der im Projekt beschäftigte Doktorand stellt eine Dissertation aus den Ergebnissen dieses Projektes zusammen und reicht diese an der Universität Leipzig ein.
- Die nach der Endauswertung erhaltenen endgültigen Datensätze werden für den weiteren, hauptsächlich modellorientierten Projektverlauf von 4DWOLKEN über Datenbanken zur Verfügung gestellt. Auch nicht direkt an 4DWOLKEN beteiligte interessierte Wissenschaftler soll der Zugang zu diesen Datenbanken ermöglicht werden.
- Zum Abschluß der 1. Phase von 4DWOLKEN wird ein **fünftes Treffen** zur Auswertung des Projektes und zur weiteren Abstimmung von gemeinsamen Veröffentlichungen organisiert.

Der folgende Balkenplan faßt die Meilensteinplanung für das beantragte Projekt zusammen:



4. Verwertungsplan

4.1 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Angesichts der langjährigen Erfahrung bei der logistischen Planung und Durchführung von Flugzeugmeßkampagnen wird davon ausgegangen, daß die geplanten Flugzeugmessungen erfolgreich durchgeführt werden. Es ist mit einem verlässlichen Datensatz zu rechnen. Die verwendeten Meßgeräte sind erprobt und werden vor und nach dem Feldexperiment in Holland (Cabauw) in institutseigenen Kalibriereinrichtungen getestet, wodurch die Datenqualität gesichert ist.

4.2 Wissenschaftliche Anschlußfähigkeit

Es werden Veröffentlichungen in internationalen, begutachteten Zeitschriften gemeinsam mit den 4DWOLKEN-Partnern des Projektverbundes 4DWOLKEN bzw. CLIWA-NET zu den Ergebnissen des Projektes angestrebt. Danach kann der im beantragten Projekt gewonnene Datensatz genutzt werden für:

- Validierung von Satelliteninversionsverfahren für optische Wolkenparameter,
- Test von Strahlungsübertragungsmodellen,
- Modellstudien zur Wolkenbildung und –auflösung,
- Modifikation der mikrophysikalischen und Strahlungs-Wolkeneigenschaften durch Aerosolpartikel,
- Validierung von Aerosol- und Wolkenmodulen in mesoskaligen und globalen Klimamodellen.

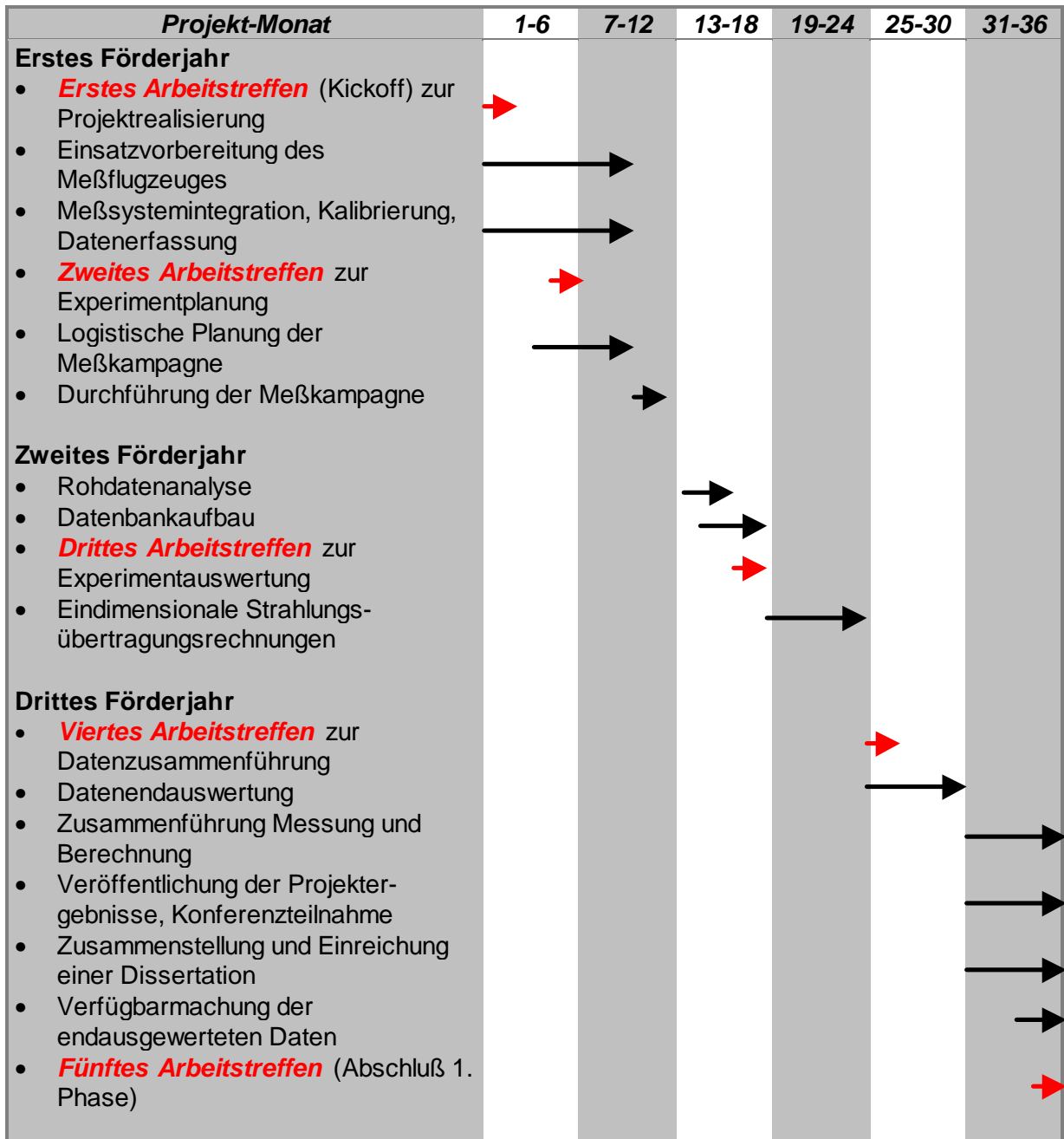
5. Zusammenarbeit mit Dritten

Das beantragte Vorhaben ist Bestandteil des Verbundprojektes 4DWOLKEN. Die Zielstellung dieses Verbundprojektes kann nur in koordinierter Zusammenarbeit der beteiligten deutschen Forschungsgruppen erreicht werden. Der vorliegende Projektantrag trägt zu 4DWOLKEN hauptsächlich durch die Bereitstellung von mikrophysikalischen und Strahlungsmessungen bei. Diese Messungen werden von den anderen Teilnehmern an 4DWOLKEN benutzt als Eingabewerte für detaillierte mehrdimensionale Strahlungs- bzw. wolkendynamische Modellberechnungen. Weiterhin dienen die Daten zur Kalibrierung der Radar-Messungen innerhalb von 4DWOLKEN.

Durch die Kombination von 4DWOLKEN und CLIWA-NET werden weitere synergetische Effekte durch eine gezielte Zusammenarbeit zwischen beiden Projekten möglich. So können die flugzeuggetragenen mikrophysikalischen Wolkenmessungen innerhalb des vorgeschlagenen Projektes zur Verifikation der bodengebundenen Flüssigwasserpfad (*LWP*) Messungen mit passiven Mikrowellensensoren innerhalb von CLIWA-NET benutzt werden. Auf der anderen Seite liefern die quasi-kontinuierlichen Mikrowellenmessungen Angaben über die zeitliche Variation der mikrophysikalischen Wolkenparameter und damit über die mehrdimensionale Wolkenstruktur. Diese Information kann im vorgeschlagenen Projekt benutzt werden, um Korrelationen zwischen dem Grad der Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Strahlungsgrößen und dem Grad der Inhomogenität in der Wolke zu quantifizieren.

Darüber hinaus bestehen enge Kontakte zu international angesehenen Wissenschaftlergruppen, die auf dem Gebiet der Wolkenmikrophysik bzw. der Strahlungsmessungen und –berechnungen weltweit führend sind (AES Toronto, NCAR Boulder, Meteo France Toulouse, Tohoko University Sendai, CCSR Tokio).

Der folgende **Balkenplan** faßt die Meilensteinplanung (s. Abschnitt 3.2 der Vorhabensbeschreibung) für das beantragte Projekt zusammen:



Dr. Rolf Stuhlmann
GKSS Forschungszentrum
Max-Planck-Straße
D-21502 Geesthacht
Tel.: 04152-87-1543
FAX: 04152-87-2020
email:rolf.stuhlmann@gkss.de

Dr. Burkhardt Rockel

Tel.: 04152-87-2008

email: burkhardt.rockel@gkss.de

Vorhabensbeschreibung zum Thema:

4D-Bewölkung der unteren Atmosphäre (4DWolken): Beobachtung mit Wolkenradar und Interpretation mit gekoppeltem Modell

1 Ziele

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Bei der Erfassung und Vorhersage des Austausches Boden-Atmosphäre und des Transportes (Wasserhaushalt) in der Atmosphäre spielt die Bewölkung eine entscheidende Rolle. Regionalmodelle, wie zum Beispiel das bei GKSS betriebene BALTEX-Modell, die Kopplung eines Regionalmodells der Atmosphäre (HRM, High-resolution Regional Model) mit einem Modell für Vegetation und Erdboden (SEWAB, Surface Energy and Water Balance Scheme), prognostizieren Wolkenwassergehalt auf der Skala ihres Modellgitters (derzeit $14 \times 14 \text{ km}^2$ für HRM-SEWAB). Subskaliger Wolkenwassergehalt wird im HRM mittels einer linearen Beziehung zur Sättigungsfeuchte diagnostiziert. Aussagen über die inhomogene Verteilung des flüssigen und festen Wolkenwassers innerhalb der Gitterbox und dessen Einfluss auf den Austausch Boden-Atmosphäre und den Transport in der Atmosphäre sind derzeit mit diesen Modellen nicht möglich.

Untersuchungen mit 3D-Monte Carlo Strahlungstransportmodellen zeigen sehr deutlich, dass bei beliebig aber fest vorgegebenem Wolkenwasserweg (sowohl für die Wasser- als auch die Eisphase) und Nichtberücksichtigung der inhomogenen Struktur eine Überschätzung sowohl der sphärischen Albedo als auch der Absorption eintritt. Im Falle einer beliebig aber fest vorgegebenen sphärischen Albedo (z. B. bei der Fernerkundungsanwendung) wird damit bei einer Nichtberücksichtigung der inhomogenen Struktur die atmosphärische Absorption unterschätzt.

Diese durch die Inhomogenität in der Verteilung des Wolkenwassers verursachte erhöhte Transparenz der Atmosphäre muss in Abhängigkeit der betrachteten Skala in den Regionalmodellen berücksichtigt werden, was derzeit unzulänglich erfolgt. So wird zum Beispiel im Regionalmodell des Deutschen Wetterdienstes (DWD) das prognostizierte Wolkenwasser generell um die Hälfte reduziert, um die Transparenz der Atmosphäre zu erhöhen, da sonst die vorhergesagte bodennahe Temperatur (2 m) zu niedrig wird.

Ziel dieses Beitrages zu dem Verbundprojekt zur Erfassung der vierdimensionalen Bewölkung der Atmosphäre ist, die bei GKSS vorhandenen Möglichkeiten der Beobachtung gemeinsam mit den Kooperationspartnern (IfM-Kiel, IfT Leipzig, IUP Heidelberg, FU Berlin, MIU Bonn, TU Dresden) im Rahmen eines internationalen Experimentes einzusetzen, um vom Boden (95GHz Wolkenradar, CT25K Laser Ceilometer), vom Flugzeug (PMS Wolkenpartikelmesssonden) und vom Satellit (NOAA-AVHRR, MSG/GERB, ENVISAT) aus Strukturen der Wolkeneigenschaften (Flüssigwassergehalt, Partikelgrößenverteilung) sowie das zugehörige Strahlungsfeld zu bestimmen und anschließend zu analysieren. Diese Datensätze dienen dann den Partnern (IfM-Kiel, IPA-Mainz und MIU-Bonn) zur Validierung und Optimierung von 3D-Strahlungsmodellen wie auch zur Entwicklung von Parametrisierungen (IPA-

Mainz, GKSS), die es erlauben den Effekt inhomogener Wolkenstrukturen sowohl auf der Skala von wolkenauflösenden dynamischen Modellen als auch nicht-wolkenauflösenden Regionalmodellen zu berücksichtigen.

Ein zweites Ziel ist in einem weiteren Schritt die Parametrisierung für die regionale Skala in das bei GKSS betriebene Modellsystem (HRM-SEWAB) zu implementieren und gemeinsam mit den Partnern (IPA-Mainz und TU-Dresden) durch Vergleich mit Satellitendatenanalysen zu validieren, damit dann abschließend eine Analyse des Einflusses von 4D-Bewölkung auf den Energie- und Wasserkreislauf auf regionaler Skala (HRM-SEWAB über dem BALTEX-Gebiet) stattfinden und dessen Wichtigkeit bewertet werden kann.

Eine direkte Verwertung der angestrebten Ergebnisse findet im Rahmen des BALTEX statt, wo das die 4D-Bewölkung berücksichtigende Regionalmodell sowohl zur erweiterten Interpretation von Messdaten für die Prozessanalyse als auch für das Rechnen von Klimaszenarien eingesetzt werden soll. Generell kann mit Hilfe der innerhalb des Verbundes entwickelte Parametrisierung zur Berücksichtigung inhomogener Wolkenstrukturen geklärt werden, ob diese bei der dynamischen Modellierung berücksichtigt werden muss und wenn ja, ob sie direkt in andere Modelle übertragen werden kann. Durch Skalenanalysen globaler Wolken Datensätze, wie zum Beispiel die des ISCCP, ließe sich eine solche Parametrisierung auch in die globalen Zirkulations- und Klimamodelle übertragen. Globalmodelle größerer Institutionen, wie z.B. das ECMWF oder der DWD, werden in der Laufzeit des Vorhabens von z.Zt. ca. 60 km horizontaler Auflösung auf 20 - 30 km umgestellt sein, was eine direkte Übernahme ermöglicht.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Es besteht ein direkter Bezug zu den förderpolitischen Zielen des Programmes der Bundesregierung „Forschung für die Umwelt“ Atmosphärenforschung 2000 (AFO 2000), speziell zu „A. Forschung zur Verbesserung des Systemverständnisses der Atmosphäre“ mit dem zu fördernden Forschungsthema „Vertikaltransporte in der Troposphäre : Wechselwirkung mit Energie-, Wasser- und Spurenstoffkreisläufen“ mit folgenden prioritären Bereichen:

- Wechselwirkungen zwischen Vertikaltransporten in der planetaren Grenzschicht und dem Spurenstoff- und Wasserhaushalt.
- Transportprozesse zwischen planetarer Grenzschicht und der freien Troposphäre unter besonderer Berücksichtigung von Wolkenbildung und Strahlungshaushalt.
- Genestete Beobachtung (in situ Flugzeug-, bodengebundene Radar- und Satellitenmessung) im Zusammenspiel mit gekoppelten Modellen (HRM regionales Atmosphärenmodell; SEWAB – gekoppeltes Hydrologiemodell) zur Integration über unterschiedliche Skalen.

International besteht ein direkter Bezug zu den Programmen des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP), speziell zum Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) mit Fokus auf das „regional continental scale experiment BALTEX“. Eine wesentliche Forderung im Rahmen des Weltklimaforschungsprogramms ist das aktive Zusammenspiel von Messung und Modell, einerseits zur Validierung der im Modell parametrisierten Prozesse, andererseits zur erweiterten Interpretation von Messdaten für die Prozessanalyse. Voraussetzung für die Analyse und Vorhersage von Transportprozessen zwischen planetarer Grenzschicht und freier Troposphäre, als auch der Prozesse, die die Umwandlung von Spurenstoffen bestimmen, ist die Kenntnis und Parametrisierung von Wolkenbildung und deren Wechselwirkung mit der Strahlung. Kritisch und derzeit noch offen ist dabei, wie der Effekt inhomogener Strukturen in der Bewölkung erfasst und über Parametrisierungen in den Modellen auf unterschiedlichen Skalen berücksichtigt werden kann.

1.3 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens

Das Ziel des hier beantragten Projektbeitrages der GKSS ist, zu bewerten welchen Einfluss die 3D-Struktur der Bewölkung und deren zeitliche Änderung auf die Vorhersage des Wasserhaushaltes mit nicht-wolkenauflösenden Modellen hat. Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung, Validierung und Bereitstellung einer Parametrisierung zur Berücksichtigung dieser 4D-Wolkeneffekte bei der Anwendung von Regionalmodellen. Damit liefert das hier beantragte Projekt sowohl einen Beitrag zur Grundlagenforschung durch die Quantifizierung von Wolkenprozessen bezüglich ihrer Auswirkung bei der dynamischen Modellierung des Wasserhaushaltes, als auch einen Beitrag in der angewandten Forschung durch die Bereitstellung einer getesteten Parametrisierung zur Verbesserung der dynamischen Modellierung auf der regionalen Skala von 15 km und größer.

2 Stand der Wissenschaft und Technik; bisherige Arbeiten

2.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Die atmosphärische Zirkulation und damit das Klima der Erde wird wesentlich durch die vierdimensionale (Zeit und Raum) Verteilung der Wolken in der Atmosphäre beeinflusst. Die mikro- (Phase, Teilchenspektrum, Teilchenform, Schmutzbeimengungen) und makrophysikalischen Wolkeneigenschaften (vertikale, horizontale Ausdehnung und Dichteänderungen; Schichtung; Höhenlage) und deren Variation im Laufe ihrer Lebensdauer verändern über die Wechselwirkung mit der Strahlung im solaren und terrestrischen Spektralbereich entscheidend die horizontale und vertikale Struktur der Strahlungsbilanz. Bei Klimaänderungen, die auch die Wolkeneigenschaften beeinflussen, ist die durch Wolken - Strahlungswechselwirkung generierte Erwärmung/Abkühlung (cloud-generated radiative heating) (Stuhlmann and Smith, 1988a,b; Sohn, 1999) der entscheidende Rückkopplungsprozess auf die Allgemeine Zirkulation, die den globalen Wasserhaushalt reguliert. Diese enge Kopplung zwischen Wasser- und Energiekreislauf erfordert, dass für Vorhersagen genutzte Modelle sowohl die Größe als auch die Variabilität der Strahlungsflüsse korrekt beschreiben müssen. Dies beinhaltet insbesondere, dass die Prozesse der Wechselwirkung von inhomogener 3D-Struktur der Bewölkung und deren zeitliche Änderung mit der Strahlung in den Modellen (von der wolkenauflösenden bis zur globalen Skala) skalenabhängig berücksichtigt werden muss.

Untersuchungen von Soden (1999) für den tropischen Bereich (30°N - 30°S) für ElNiño/LaNiña Perioden zeigen zum Beispiel, dass globale Zirkulationsmodelle (GCMs) die beobachteten Änderungen in der Atmosphärentemperatur und dem Wasserdampfgehalt korrekt reproduzieren. Unter der Voraussetzung, dass die aus Beobachtungen abgeleiteten Niederschlagssummen der Realität entsprechen, unterschätzen diese Modelle jedoch die Variabilität des Niederschlages um den Faktor Drei. In erster Näherung wird das Freiwerden von latenter Wärme während der ElNiño Perioden durch eine Zunahme der Strahlungsabkühlung ausgeglichen und die daraus resultierende Temperaturtendenz ist primär durch das Residuum dieser beiden Größen bestimmt (Graham, 1995). Strahlungsbilanzexperimente wie das Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) (Barkstrom, 1984) oder Scanner for Radiation Budget (ScaRaB) (Kandel et al., 1998) zeigen, dass die Modellergebnisse der Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre gut mit den Ergebnissen dieser Experimente übereinstimmen. Systematische Differenzen gibt es allerdings für die Strahlungsbilanz am Erdboden. Vergleiche mit Abschätzungen der langwelligen Strahlungsbilanz am Erdboden aus Satellitendaten (Darnell, 1996) zeigen zum Beispiel, dass die Modellrechnungen die Variabilität dieser Größe, analog wie für den Niederschlag, systematisch unterschätzen, was auf eine fehlerhafte Beschreibung der Wolkeneigenschaften bezüglich der Erfassung ihrer 3D-Struktur und deren zeitlicher Änderung hinweist. Problematisch ist auch eine Berücksichtigung dieser Wol-

keneffekte in den Regionalmodellen wo derzeit systematische, mehr oder weniger empirisch eingefügte, Korrekturen des Wolkenwassers erfolgen, um hierfür Rechnung zu tragen. So wird zum Beispiel für die Berücksichtigung der Strahlungswirkung im Deutschlandmodell des Deutschen Wetterdienstes das prognostizierte Wolkenwasser halbiert, weil anderenfalls bei bedecktem Himmel zu wenig solare Strahlung den Erdboden erreicht und eine zu starke Reduktion des Tagesganges der bodennahen Temperaturen auftritt (Schrodin et al., 1995).

Das eine nicht vollständige Erfassung der zeitlichen Änderung der dreidimensionalen Struktur der Wolkeneigenschaften ein potentieller Grund für systematische Fehler bei der Beschreibung der Strahlungsflüsse in den Modellen sein kann, wird dadurch deutlich, dass die Variabilität der Wolkenunterkantenhöhe wesentlich die langwellige Strahlungsbilanz sowohl für den Erdboden als auch die Atmosphäre bestimmt, wogegen Randeffekte der Bewölkung und Wechselwirkung zwischen den Wolkenschichten in Verbindung mit variierender Wolkenmikrophysik die solare Strahlungsbilanz maßgeblich modifizieren.

Untersuchungen mit 3D-Monte Carlo Strahlungstransportmodellen zeigen sehr deutlich, dass bei beliebig aber fest vorgegebenem Wolkenwasserweg (sowohl für die Wasser- als auch die Eisphase) und Nichtberücksichtigung der inhomogenen Struktur eine Überschätzung sowohl der sphärischen Albedo als auch der Absorption eintritt. Im Falle einer beliebig aber fest vorgegebenen sphärischen Albedo (z. B. bei der Fernerkundungsanwendung oder auch im Falle Globaler Zirkulationsmodelle, wo es sinnvoll ist, die Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre unverändert zu erhalten) wird damit bei einer Nichtberücksichtigung der inhomogenen Struktur die atmosphärische Absorption unterschätzt.

Die Entwicklung von Messmethoden und Rechnerkapazitäten der letzten Jahre erlaubt inzwischen die direkte Erfassung und Untersuchung der durch Wolken verursachten räumlichen und zeitlichen Variabilität des Strahlungsfeldes (Danne et al., 1996; Danne et al., 1999b; Quante et al., 1999; Weitkamp, et al., 1999), sowie die Parametrisierung der Effekte von Wolkeninhomogenitäten (Barker and Wielicki, 1997; Barker et al., 1999, Cairns et al., 2000) und die Untersuchung ihres Einflusses bei der Modellierung auf der Wolkenskala (Coley and Jonas, 1997).

Die Prozesse, die zur Berücksichtigung dieser 4D-Wolkeneffekte bei der dynamischen Modellierung erfasst werden müssen sind skalenabhängig, und es wird erwartet, dass sie sich im wesentlichen in zwei Klassen aufgliedern. Die erste Klasse betrifft die Modellierung auf der Wolkenskala und die damit verbundene Fragestellung wieweit dynamische Modelle dieser Skala notwendigerweise explizite Rechenzeit aufwendige 3D Monte Carlo Strahlungstransportrechnungen beinhalten müssen. Bei einer Entkopplung der vertikalen Säulen voneinander (individuelle 1D Strahlungstransportrechnungen für jede Atmosphärensäule), also einer Anwendung der sogenannten Independent Pixel Approximation (IPA), wird der horizontale Transport vernachlässigt und die Variabilität der durch Strahlungswechselwirkung verursachten Erwärmung auf dieser Skala überschätzt, was direkt auf die Dynamik rückkoppelt. Die zweite Klasse betrifft die nicht-wolkenauflösenden Modelle von der regionalen bis zur globalen Skala. Es wird hier erwartet, dass eine Anwendung der IPA auf diesen Skalen hinreichend ist und der Effekt gegenüber einer Monte Carlo Rechnung vernachlässigt werden kann. Das Hauptproblem dabei ist der nichtlineare Zusammenhang zwischen Wolkenwasser und Strahlungsflüssen und damit mehr ein Problem der Mittelwertbildung. Hier müssen Parametrisierungen entwickelt werden, die es erlauben, in Abhängigkeit der innerhalb einer Gitterbox gegebenen Inhomogenität skalierte Wolkeneigenschaften zu bestimmen, die einem strahlungsgewichteten Mittelwert des Wolkenwassers entsprechen. Erste Ansätze hierzu können der Arbeit von Cairns et al. (2000) entnommen werden, wo mit einem Korrekturterm die Wolkenextinktion, die Einfachstreualbedo und der Asymmetriefaktor skaliert werden. Dieser Korrekturfaktor, der als relative Varianz bezeichnet wird, hängt direkt mit dem Logarithmus der Standardabweichung der Wolkenpartikelverteilung zusammen. Über die Vermessung von Wolkenstrukturen, Wolkenmikrophysik und zugehörigen Strahlungsflüssen können Aussagen über die Variabilität dieses Korrekturtermes in Abhängigkeit der Mo-

dellskala (regional bis global) für Regionen mit unterschiedlichen Wolkenregimen abgeleitet werden. Es wird erwartet, dass eine erste Abschätzung dieses Korrekturtermes über die Satellitenfernerkundung möglich ist, so dass für betrachtete Modellregionen statistische Aussagen über Größe und Variabilität dieses Korrekturtermes gemacht werden können. Im globalen Datensatz des International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) (Rossow and Schiffer, 1999) werden zum Beispiel für die globale Skala ($250 \times 250 \text{ km}^2$) zwei unterschiedliche wolkenoptische Tiefen berechnet. Dies ist einmal der lineare Mittelwert, der aus den Einzelmessungen berechneten optischen Tiefe, die dem in der Region vorhandenem Wolkenwasserweg entspricht. Die zweite optische Tiefe ist die strahlungswirksame optische Tiefe, die dem mittleren Strahlungsfluss der Region entspricht. Es wird erwartet, dass der von Crains et al. (2000) diskutierte Korrekturterm in Zusammenhang mit diesen beiden im ISCCP Datensatz zur Verfügung gestellten Größen zusammenhängt. Lässt sich dies bestätigen, kann eine langjährige globale Statistik des Korrekturtermes zur Nutzung in globalen Zirkulationsmodellen direkt aus diesem Datensatz errechnet werden. Für die Anwendung in Regionalmodellen lässt sich dann analog zu dem ISCCP Datensatz durch Auswertung von Satellitendaten innerhalb der Modellskala über dem betrachteten Modellgebiet ähnlich verfahren.

Notwendig neben der Entwicklung solcher oben angesprochenen Parametrisierungen ist es, Informationen über die Struktur der Bewölkung und deren zeitliche Änderung global auf den unterschiedlichen Skalen zu bestimmen. Initiiert über das Weltklimaforschungsprogramm (WCRP) wurden inzwischen internationale Satellitenmissionen vorgeschlagen wie die Earth Radiation Mission (ERM) der Europäer und Japaner bzw. die CLOUDSAT Mission der Amerikaner, die erstmalig Radar und Lidar Geräte im Weltraum vorsehen, die die globale Erfassung der dreidimensionalen Struktur der Bewölkung und deren Einfluss auf die Erzeugung von Strahlungserwärmung und Wasserhaushalt erlauben sollen.

Die Notwendigkeit einer korrekten Erfassung und Parametrisierung der zeitlichen Änderung der räumlichen Strukturen der Wolken beschränkt sich aber nicht nur auf ihren Einfluss auf atmosphärische Transporte, sondern ist auch eine zentrale Fragestellung in der troposphärischen Photochemie (Lelieveld and Crutzen, 1991; Los et al., 1997).

2.2 Bisherige Arbeiten des Anbieters

Ziel dieses Beitrages zu dem hier vorgeschlagenen Verbundprojekt zur Erfassung der vierdimensionalen Bewölkung der Atmosphäre ist, die bei GKSS vorhandene Expertise bei der Beobachtung einzusetzen, um den Einfluss der Wolkeneigenschaften auf das Strahlungsfeld zu bestimmen und anschließend mit der bei GKSS vorhandenen Expertise der Modellierung den Einfluss der inhomogenen Wolkenstrukturen auf den Austausch Boden-Atmosphäre und den Transport (Wasserhaushalt) in der Atmosphäre zu untersuchen.

Dieses vorgeschlagene aktive Zusammenspiel von Messung und Modell, einerseits zur Validierung der im Modell parametrisierten Prozesse, andererseits zur Interpretation beschränkter Datensätze für eine umfassendere Prozessanalyse, ist unter anderem eine zentrale Forderung des WCRP und ein Schwerpunkt im Themenfeld „Energie und Wasserkreisläufe“ des Forschungs- und Entwicklungsprogrammes der GKSS, in dem während der letzten Jahre kontinuierlich Entwicklungsarbeit geleistet wurde.

Seit Beginn der 90er Jahre wurde im Institut für Atmosphärenforschung der GKSS nicht nur das notwendige Instrumentarium zur Erzeugung von Multiparametersätzen mikrophysikalischer Wolkenparameter und die dafür notwendige Auswertesoftware angeschafft und entwickelt, sondern auch durch die Beteiligung an zahlreichen nationalen und internationalen Projekten (z.B. EUCREX 1993/94, REFLEX 1994/95, EURICE 1997/98, ARTIST 1997/2000) mit Feldmesskampagnen in Europa und der Arktis die notwendige Kompetenz erworben, um heute auch ein gefragter Partner für die Luftfahrtindustrie bei der Untersuchung von Flug-

zeugvereisungen und in Übersee zu sein. So existieren seit mehreren Jahren gute Kooperationsbeziehungen zum kanadischen Wetterdienst AES (Atmospheric Environment Service) in Toronto und neuerdings auch zum NCAR (National Center for Atmospheric Research) in Boulder sowie zur NASA in Cleveland. Insbesondere die Arbeiten zur Verbesserung der Datenqualität beim Einsatz im Flugzeug und zur Entwicklung von prozessnahen Kalibriermethoden erlauben die Messungen der für die Modellierung wichtigen Parameter, wie Partikelgrößenverteilung und Flüssigwassergehalt, in einem Größenbereich von 0,3 µm bis 6,4 mm Teilchendurchmesser in guter Qualität. Dies kann durch folgende Veröffentlichungen belegt werden:

- Inhomogenitäten in Wolken (Albers et al., 1999; Buschmann und Albers, 2000)
- Strahlungsflüsse in arktischen Zirruswolken (Masuda et al., 1999)
- Untersuchungen zur Verbesserung der Messgenauigkeit von optisch abbildenden PMS-Sonden (Reuter und Bakan, 1998; Strapp et al., 2000)

Im Bereich der in-situ Messungen von dynamischen und thermodynamischen Parametern in Wolken und in der freien Atmosphäre und deren Interpretation konnten umfangreiche Erfahrungen in verschiedenen Feldkampagnen (ICE, EUCREX, Pre-EUCREX, ARM-CART) gewonnen werden:

- Flugzeugmessungen von Turbulenz und thermodynamischen Größen im Cirrusniveau (Quante et al. 1996; Quante und Starr, 2000).
- Interpretation von Messergebnissen in Hinsicht auf die Wolkenmodellierung (Starr und Quante, 2000).

Die Arbeitsgruppe „Wolkenradar“ bei GKSS betreibt seit 1996 ein bodengebundenes 95-GHz System. Nach einer Evaluierungsphase und ersten systematischen Fallstudien wurde das Wolkenradar auf internationalen Feldkampagnen in England und Frankreich eingesetzt. Neben den auf Messungen basierenden Arbeiten wurden auch theoretische Untersuchungen zur Interpretation der Radarsignale durchgeführt sowie eine umfassende Studie zu einem satellitengestützten Wolkenradar für die Europäische Weltraumbehörde ESA angefertigt. Im einzelnen sind dies:

- Studien zur Struktur von Wolken, zum Teil mit unseren amerikanischen Partnern (Danne et al. 1996; Quante et al. 1996; Danne et al. 1999b; Weitkamp et al. 1999)
- Studien zur dynamischen und mikrophysikalischen Struktur von Eiswolken (Fujiyoshi et al., 1999, Danne et al. 1999a).
- Teilnahme am ESA-ESTEC Projekt zum koordinierten Einsatz von Radar und Lidar, CLARE (Quante et al. 1999).
- Ableitung von mikrophysikalischen Parametern aus Radar-Lidar Messungen im EU Projekt CARL (Noel et al., 2000).
- theoretische Arbeiten zu Rückstreuungseigenschaften von Eiskristallen (Okamoto et al, 1994; Lemke et al., 1998; Lemke und Quante, 1999).
- Studie und Beiträge zum geplanten Satellitenradar der ESA (Lemke et al, 1997; Quante et al., 1998).
- Mitarbeit im Science Team des US-kanadischen Satellitenprojektes CloudSat (M. Quante).

Im Bereich der Satellitenfernerkundung wurden Arbeiten innerhalb des GKSS Themenfeldes „Energie und Wasserkreisläufe“ zur Instrumentenkalibration (ScaRaB: Scanner for Radiation Budget; GERB: Geostationary Earth Radiation Budget Instrument), Experimentbeteiligung (ScaRaB; GERB), Bestimmung von Strahlungsbilanzgrößen und Modellvalidierung durch-

geführt. Dies ist im einzelnen in den folgend aufgelisteten Veröffentlichungen dokumentiert worden:

- Beteiligung an den Experimenten ScaRaB und GERB (Müller et al., 1996; Müller et al., 1997; Kandel et al., 1998; Müller, Stuhlmann und Hollmann, 1999; Müller et al., 1999).
- Bestimmung von Strahlungsbilanzparametern (Hollmann et al., 1999a; Pereira et al., 1999; Pereira et al., 2000).
- Nutzung von Satellitendaten zur Validierung von Regionalmodellen (Ahrens et al., 1998; Hollmann et al., 1999b; Stuhlmann et al., 1999; Stuhlmann, 1999; Hollmann, Müller und Stuhlmann, 2000).

Zur Unterstützung der hier vorgeschlagenen Arbeiten fand eine Beteiligung an den Ausschreibungen zur Nutzung der ENVISAT Daten (Projektvorschlag AO-ID 348) und der MSG Daten (Projektvorschlag AO-ID 137) statt, die beide positiv begutachtet wurden. Damit gewährleisten ESA und EUMETSAT einen Zugriff auf die gewünschten Daten.

In den vergangenen Jahren wurden am Institut für Atmosphärenphysik der GKSS sowohl auf dem Gebiet der regionalen atmosphärischen Modellierung als auch bei der Erstellung von Landoberflächen- und Hydrologiemodellen für die regionale Skala wesentliche Fortschritte erzielt (Raschke et al., 1998). Dies sind im einzelnen die folgenden (falls die Ergebnisse der Arbeiten schon veröffentlicht wurden, so ist dies jeweils in Klammern angegeben):

- Übertragung des Wettervorhersagemodells des Deutschen Wetterdienstes auf das Ostseeinzugsgebiet (Karstens et al., 1996).
- Validation dieses Modells anhand von ISCCP-Daten (Wolkenbedeckungsgrad, Flüssigwassergehalt) und Niederschlagsdaten von synoptischen und Regenstationen (Ahrens et al., 1998).
- Teilnahme an internationalen Vergleichen (z.B. GCSS) mit den Atmosphärenmodellen GESIMA und REMO. Es wurde hierbei u.a. eine Methodik zur Verbesserung von Wolkenparametrisierungen in größerskaligen Atmosphärenmodellen entwickelt (Ryan et al., 2000).
- Entwicklung eines Abflussschemas für Flussgebiete (Lohmann et al., 1996).
- Entwicklung eines SVAT-Modells (SEWAB) und Teilnahme am internationalen Vergleich PILPS2c (Mengelkamp et al., 1999).
- Zusammenstellung und Auswahl von geeigneten statistischen Verfahren zur Validierung von Ergebnissen des REMO (Ahrens et al., 1998).
- Kopplung des regionalen Atmosphärenmodells HRM mit dem SVAT-Modell SEWAB.
- Übertragbarkeitsstudien des REMO/HRM auf andere Gebiete der Erde.

Bisher modellierte Zeitperioden mit dem Atmosphärenmodell REMO umfassen Mai/Juni 1993 und August bis November 1995 (PIDCAP), da aus diesen Perioden sehr detaillierte Datensätze zusammengetragen werden konnten. Aus diesem umfangreichen Datensatz wurden für die bislang modellierten Zeitperioden die Parameter Bodenluftdruck, 2 m Luft- und Taupunkttemperatur, 10 m Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie tägliche Niederschlagssummen für die Validierung vorbereitet (z.B. Karstens et al., 1996). Außerdem wurde mit der Validierung einiger dieser Parameter im Hinblick auf die Korrektur systematischer Messfehler der gemessenen Niederschläge begonnen. Informationen über Typen der verwendeten Niederschlagsgeräte im BALTEX-Gebiet und zugehörige Korrekturfunktionen wurden zusammengetragen.

1999 wurde zusätzlich zum REMO das HRM an der GKSS installiert. Dies basiert auf dem neuen Globalmodell des DWD und unterscheidet sich in seinem adiabatischen und diabatischen Teil nur in wenig von der GKSS Version des REMO. Wesentliche Änderungen sind allerdings die modernere und klarere Programmierung, was erhebliche Vorteile bei der Nutzung für Forschungszwecke mit sich bringt.

3 Ausführliche Beschreibung des Arbeitsplans

3.1 Vorhabenbezogene Ressourcenplanung

Das von GKSS vorgeschlagene Arbeitspaket gliedert sich in zwei Schwerpunkte, die Messungen und die Modellierung und soll in Kooperation mit den am Verbund beteiligten Partnern - IfM-Kiel, MPI-Hamburg, MIU-Bonn, IfT-Leibzig, TU-Dresden, FU-Berlin, IPA-Mainz und DWD (siehe hierzu auch deren spezielle Beiträge) durchgeführt werden.

In der ersten Phase der Antragstellung liegt der Schwerpunkt auf dem Experiment zur Erfassung von inhomogenen Wolkenstrukturen (95-GHz Wolkenradar, CT25K Laser Ceilometer, PMS Wolkenpartikelmesssonden und Nevzorov_Sonde zur Messung von Flüssig- und Gesamtwassergehalt von Wolken) und deren Einfluss auf den solaren und terrestrischen Strahlungsfluss am Erdboden (Pyranometer- und Pyrgeometermessungen), sowie am Oberland der Atmosphäre (NOAA-AVHRR, MSG/GERB [AO-ID 137], ENVISAT [AO-ID 348]).

In der zweiten Phase liegt der Schwerpunkt auf der Anwendung. Im Bereich der Modellierung sollen die gemeinsam im Verbund abgeleiteten Parametrisierungen zur Berücksichtigung von 3D-Wolkeneffekten in das bei GKSS entwickelte Modellsystem HRM-SEWAB implementiert und an Hand von Satellitendaten (MSG/GERB [AO-ID 137], ENVISAT [AO-ID 348]) validiert werden. Parallel dazu soll auch der Einfluss inhomogener Wolkenstrukturen auf den Austausch Boden-Atmosphäre und den Transport (Wasserhaushalt) in der Atmosphäre mit dem gekoppelten Modell untersucht werden.

Direkte Kooperationsschwerpunkte bestehen bei der Messung zu MIU-Bonn, und IfT-Leibzig für den Einsatz der bodengebundenen GKSS Instrumente, zum IfT-Leibzig und der FU-Berlin bei der gemeinsamen Flugzeugmesskampagne, der TU-Dresden und dem IfM-Kiel bei der Analyse von Satellitendaten. Die Entwicklung der Parametrisierungen zur Berücksichtigung inhomogener Wolkenstrukturen bei der regionalen Modellierung erfolgt im direkten Verbund mit dem IfM-Kiel, MIU-Bonn, IPA-Mainz, die zur Berücksichtigung inhomogener Wolkenstrukturen im Falle der Fernerkundung erfolgt in Kooperation mit IfM-Kiel und TU-Dresden. International ist der hier vorgeschlagene GKSS-Beitrag eingebettet in die EC-Projekte CLIWA-NET und Exploitation of GERB, der Entwicklung der EUMETSAT Climate Monitoring Satellite Application Facility, sowie BALTEX.

3.1.1 Beschreibung des GKSS 95-GHz Wolkenradars

Das GKSS Forschungszentrum Geesthacht, Institut für Atmosphärenphysik, hat 1996 das 95-GHz Wolkenradar MIRACLE (Millimeter-wave radar for cloud layer exploration) in Betrieb genommen. Es handelt sich um ein kohärentes, polarimetrisches Pulsradar. Die Pulsfolgefrequenz, die Anzahl und Lage der Entfernungszellen sowie die Pulslänge können über die Betriebssoftware gesetzt werden, sie ermöglichen eine Zellenauflösung zwischen 7.5 und 82.5 m bis zu einer Entfernung von ca. 15 km, das Fernfeld beginnt bei 900 m. Die Strahlbreite der Antenne führt zu einem Pulsolumendurchmesser von etwa 30 m in 10 km Entfernung. Zur Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses werden eine bestimmte Anzahl von Profilen on-line gemittelt, die auf diese Weise erzielbare typische minimale Sensitivität liegt bei -40 dBZ in 1 km Entfernung und 1 s Mittelungsintervall. Als Produkte der Rückstreumessungen stehen der äquivalente, horizontale bzw. vertikale Reflektivitätsfaktor, die differentielle Reflektivität, das lineare Depolarisationsverhältnis und der kopolare Korrelati-

onskoeffizient zur Verfügung. Die Dopplersignalauswertung liefert die mittlere Radialgeschwindigkeit der Streuer in der jeweiligen Volumenzelle und deren Standardabweichung mittels Puls-Pair Algorithmus oder das vollständige Spektrum über einen FFT-Algorithmus. Das Radar wird intern geeicht und wurde und wird zur Überprüfung direkt neben einem extern geeichten, vergleichbarem Radar betrieben. Der Eichfehler beträgt in etwa 2 dB, er sollte durch Vergleich mit in-situ Messungen unter geeigneten Bedingungen überprüft werden. Eine Positioniereinheit ermöglicht Antennenbewegungen in Elevation und Azimut und erlaubt somit die dreidimensionale Erfassung von Wolkenfeldern. Die Unterbringung des Gesamtsystems inkl. Arbeitsplatz in einem Seecontainer lässt den Transport zu unterschiedlichsten Einsatzorten zu. Eine umfassende Beschreibung des Systems und ausgewählte Messbeispiele können Quante et al. (1998) entnommen werden.

3.1.2 Beschreibung der in situ Messtechnik (PMS Sonden)

Das Institut für Atmosphärenphysik der GKSS verfügt über eine Reihe von Partikelmesssonden der Firma PMS (Particle Measurement Systems) zur direkten Messungen der Partikelgröße und -konzentration. Der Flüssigwassergehalt der mit der jeweiligen Sonde erfassten Wolkentröpfchen lässt sich daraus ableiten. Die nach dem Prinzip der Vorwärtsstreuung arbeitenden Sonden (FSSP-300, FSSP-100 und FSSP-100 ER) gestatten Messungen im Größenbereich von 0,3 μm bis 95 μm Teilchendurchmesser und sind somit für die Bestimmung mikrophysikalischer Parameter von Aerosolen und Wolkentröpfchen geeignet. Größere Wolkentröpfchen können mit den sog. optisch abbildenden Sonden (OAP-2D2-C, OAP-2D-G-A2) in einem Größenbereich von ca. 20 μm bis 800 μm Durchmesser bis hin zur Größe von Niederschlagsteilchen (OAP-2D2-P), d.h. bis zu 6,4 mm Durchmesser, erfasst werden. Darüber hinaus steht zur direkten Bestimmung des Flüssigwasser- und Gesamtwassergehaltes die nach ihrem Erfinder benannte Nevzorov Sonde zur Verfügung.

3.1.3 Messprogramm

Das GKSS Wolkenradar wird an drei koordinierten Feldexperimenten teilnehmen, von denen zwei in Geesthacht und eins in Cabauw, NL, stattfinden sollen. Während der intensiven Messphasen werden Vertikalprofile des Reflektivitätsfaktors, der Dopplergeschwindigkeit, der Standardabweichung und der linearen Depolarisation zu ausgewählten Zeiten, die mit Satellitenüberflügen abgestimmt sind, aufgenommen. Dabei wird zur Erfassung auch von kleineren Horizontalstrukturen die zeitliche Auflösung auf ca. 1 s gesetzt. Die Vertikalauflösung wird problemangepasst zwischen 37 und 82.5 m betragen.

Aus den Messungen lassen sich die makroskopischen Wolkenparameter wie die Wolkenkanten und Anzahl der Schichten sowie deren internen Strukturen ableiten. Die absoluten Werte der Reflektivitätsmessungen sollen mit den Daten aus Lidar- (Ceilometer) und Mikrowellenradiometermessungen, in Zusammenarbeit mit den Partnern, zusammengeführt werden, um Algorithmen zur Abschätzung mikrophysikalischer Parameter zu testen und weiterzuentwickeln. Zur Erfassung der effektiven Wolkenunterkante ist die Kombination von Radar und Ceilometer essentiell, um die optischen Wolkengrenzen von den Radarunterkanten zu trennen, insbesondere auch, um Gebiete mit Nieselniederschlag, der häufig einige hundert Meter unterhalb der Wolken wieder verdunstet ist, zu identifizieren.

In einigen ausgewählten Fällen soll das Radar mit Hilfe der Positioniereinrichtung die dreidimensionale Struktur von tiefen Wasserwolken erfassen. Die dabei auftretende Dämpfung des Signals auf langen Wegen durch Wasserwolken ist in dem Fall mit Hilfe von Flüssigwasserpfaden, die von Mikrowellenradiometern aufgenommen werden, zu korrigieren. Ein koordiniertes Scannen der beteiligten Messsysteme ist dazu erforderlich, hierzu ist insbesondere das scannende Radiometer des Bonner Partners geeignet.

Um die Qualität der Daten zu gewährleisten, sind die im Vorlauf der Kampagnen stattfindenden Eichungen des Wolkenradars während der Messphasen durch in-situ Messungen von

Wolkentröpfchenverteilungen (Erfassung des gesamten Spektrums durch FSSP und OAP-Sonden von PMS) in reinen Wasserwolken zu validieren. Diese in-situ Daten können im weiteren dann auch zur lokalen Validierung von abgeleiteten Wolkenparametern, wie des Wassergehaltes und der effektiven Teilchengröße herangezogen werden. Dazu sind spezielle Flugmuster in verschiedenen Höhenbereichen der Wolken anzusetzen. Erste Erfahrung zu den Anforderungen an den in-situ Vergleich konnten während vorausgegangener Überfliegungen gesammelt werden. Die Flugmuster sind möglichst auch mit den Überfliegungen des Radars mit dem A-Band-Spektrometer der FU Berlin zu koordinieren.

In Abstimmung mit dem Kooperationspartner IfT sollen bei dem Feldexperiment in Cabauw vorrangig die optisch abbildenden Sonden zur Ergänzung des mit der IfT-Technik erfassten Partikelgrößenbereichs zum Einsatz kommen. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass auf Grund der eingeschränkten finanziellen Möglichkeiten nicht das gesamte Größenspektrum, wie es zur Validierung der o.g. Wolkenradarmessungen notwendig ist, erfasst werden kann. Die Existenz von großen Wolkentropfen lassen sich mit der eingeschränkten Gerätekonfiguration nicht nachweisen.

Parallel zu dem Wolkenradar betreibt GKSS am jeweiligen Standort des Radars während seiner Messkampagnen das CT25K Laser Ceilometer und ein Pyranometer und Pyrgeometer zur Messung der Strahlungsflüsse am Erdboden.

Mit der bei GKSS vorhandenen Satellitenempfangsanlage werden die Überflüge der NOAA Satelliten über das RADAR aufgenommen, archiviert und den an der Satellitenauswertung beteiligten Gruppen zur Verfügung gestellt. GKSS hat Algorithmen zur Bestimmung der Strahlungsbilanz aus NOAA-AVHRR Daten entwickelt. Diese sollen zur Bestimmung der Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre eingesetzt werden. Nach Start von MSG erfolgt auch die Einbeziehung der Daten von GERB und SEVIRI (akzeptiertes EUMETSAT/ESA Proposal AO-ID- 137) und nach dem Start von ENVISAT auch die Nutzung dieser Daten (akzeptiertes ESA Proposal AO-ID-348).

Die auf diese Art gewonnenen Wolkenstruktur- und Strahlungsbilanzfelder können dann der Strahlungstransport- und dynamischen Modellierung als Eingangsdaten dienen.

3.1.4 Modelle

Das an der GKSS betriebene Modellsystem HRM-SEWAB ist ein gekoppeltes Modell für die Atmosphäre und den Erdboden. Es ist insbesondere mit dem Ziel einer möglichst realitätsnahen Beschreibung des Energie- und Wasserkreislaufs über dem BALTEX-Gebiet zusammengestellt und weiterentwickelt worden. Das Modell ermöglicht eine räumliche horizontale Gitterauflösung zwischen etwa 10 und 100 km. Die atmosphärische Komponente wird dabei derzeit durch das hydrostatische Regionalmodell HRM (horizontale Gitterauflösung 10-100 km) repräsentiert. Dies unterscheidet sich in dem adiabatischen und diabatischen Modellteil nur gering von der auch an der GKSS betriebenen Version des Regionalmodells REMO. Wesentliche Änderungen sind allerdings die modernere und klarere Programmierung, was wesentliche Vorteile bei Nutzung für Forschungszwecke mit sich bringt.

REMO ist eine gemeinschaftliche Entwicklung von DWD, MPI und GKSS, und ist eine Weiterentwicklung des Europamodells des DWD. Die in REMO implementierten physikalischen Parametrisierungen von Strahlungs- und Wolkeneigenschaften entsprechen denen, wie sie auch in heutigen Globalmodellen benutzt werden. Das HRM basiert auf dem neuen Globalmodell GME des DWD.

Mit REMO/HRM werden Studien im internationalen Projekt GCSS (GEWEX Cloud System Study) durchgeführt.

SEWAB (Surface Energy and Water Balance Scheme) ist ein an der GKSS entwickeltes SVAT-Model (Mengelkamp et al., 1999). Mit SEWAB wurden u.a. Vergleiche im internationalen Experiment PILPS (Wood et al., 1998, Liang et al., 1998, Lohmann et al., 1998) durchgeführt.

3.2 Arbeitspakete und Meilensteinplanung

Entsprechend dem Balkenplan setzt sich der von GKSS beantragte Projektbeitrag aus 12 Arbeitspaketen zusammen, die damit auch die Meilensteine definieren.

1. Projektstart:
Kick-Off Meeting in Bonn. Koordinierende Absprachen mit allen Projektbeteiligten und externen Partnern
2. Vorbereitung Experiment Cabouw:
Der wesentliche Beitrag ist hier die Anpassung der Partikelmesstechnik an das im Cabouw eingesetzte Flugzeug. Dies beinhaltet insbesondere ausgiebige Tests im Vorfeld. (Beitrag zum Arbeitspaket 2100 des Gesamtvorhabens)
3. Experiment Geesthacht-1:
Beteiligung des Wolkenradars an der CLIWA-NET Vorkampagne am Standort Geesthacht. Archivierung und Bereitstellung von Satellitendaten für die interne Nutzung und zur Weitergabe an die Projektpartner auf Nachfrage. (Beitrag zum Arbeitspaket 2100 des Gesamtvorhabens)
4. Experiment Geesthacht-2:
Beteiligung des Wolkenradars an der CLIWA-NET Vorkampagne am Standort Geesthacht. Archivierung und Bereitstellung von Satellitendaten für die interne Nutzung und zur Weitergabe an die Projektpartner auf Nachfrage. (Beitrag zum Arbeitspaket 2100 des Gesamtvorhabens)
5. Experiment Cabouw:
Durchführung des CLIWA-NET / 4D-Bewölkungshauptexperiments. Schwerpunkt bildet hier der Einsatz der Partikelmesstechnik, koordiniert mit den Wolkenradarmessungen und der Datenarchivierung von Satellitenüberflügen. (Beitrag zu den Arbeitspaketen 2100 und 2200 des Gesamtvorhabens)
6. NOAA-AVHRR Satellitenarchiv:
Aufzeichnung von NOAA-AVHRR Überflügen über dem BALTEX Gebiet während der Hauptmesskampagnen bei BALTEX BRIDGE. Satellitendatenaufbereitung für die Modellvalidierung und Analyse des Energie- und Wasserhaushaltes (siehe Arbeitspakete 10 und 11). Bereitstellung der Satellitendaten auf Anfrage der Projektpartner für den Einsatz 3D-Strahlungstransportmodelle und Entwicklung von Parametrisierungen. (Beitrag zum Arbeitspaket 4100 des Gesamtvorhabens)
7. 4D-Wolkenanalyse:
Auswertung der Experimentdaten in Synergie mit den Ergebnissen der Projektpartner zur gemeinsamen Erstellung eines 4D-Wolkendatensatzes zur Nutzung bei der Entwicklung von Parametrisierungen und zu deren Validierung beim Einsatz in den entsprechenden Modellen. (Beitrag zu den Arbeitspaketen 3200 und 4200 des Gesamtvorhabens)
8. 4D-Wolkenempfindlichkeitstests:
Parallel zur Datenauswertung (siehe Arbeitspaket 7) werden Empfindlichkeitstests mit dem Modellsystem HRM-SEWAB durchgeführt, um das Verhalten des Modells auf seine Empfindlichkeit bezüglich der 3D-Parametrisierungen zu testen. Gleichzeitig soll damit abgeschätzt werden welche Änderungen bei der Prognose des Wasserkreislaufes erwartet werden können. Ebenfalls sollen diese Empfindlichkeitstest Hilfestellung für das Arbeitspaket 7 leisten, indem sie spezifizieren welche Beobachtungsgrößen für die Entwicklung der 3D-Parametrisierungen entscheidend sind. (Beitrag zum Arbeitspaket 4200 des Gesamtvorhabens)
9. Entwicklung / Implementierung von 3D-Wolken Parametrisierung:

Die in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern aus den 4D-Wolkenanalysen (siehe Arbeitspaket 7) zu entwickelnde 3D-Wolkenparametrisierung wird in das HRM-SEWAB eingebaut und auf Plausibilität entsprechend der Vorarbeiten in Arbeitspaket 8 geprüft.
(Beitrag zum Arbeitspaket 4100 des Gesamtvorhabens)

10. Validierung und Analyse 4D-Wolkeneffekte:

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wird das HRM-SEWAB mit der 3D-Wolkenparametrisierung an Hand von Satellitendaten und der 4D-Wolkenanalyse (Arbeitspaket 7) geprüft. Die validierte Parametrisierung wird der Wissenschaftsgemeinschaft zur Verfügung gestellt.

(Beitrag zum Arbeitspaket 4200 des Gesamtvorhabens)

11. Analyse des Einflusses 4D-Wolken auf den Energie- und Wasserkreislauf:

Modellrechnungen mit dem HRM-SEWAB mit und ohne 3D-Wolkenparametrisierung werden für das BALTEX Gebiet durchgeführt. Damit soll abschließend bewertet werden, welchen Stellenwert der Einfluss der 4D-Bewölkung auf die Wassertransporte in Regionalmodellen hat.

(Beitrag zum Arbeitspaket 4300 des Gesamtvorhabens)

12. Projektabschluss:

Zusammenfassen der Ergebnisse, Erstellung des Abschlussberichtes.

Meilensteine gibt es jeweils zum Abschluss wichtiger Arbeitspakete. Die dabei erzielten Ergebnisse werden auf den Projekttreffen dargestellt und abschließend in gemeinsamen Veröffentlichungen der Wissenschaftsgemeinschaft zur Verfügung gestellt:

M-1: Nach Abschluss von AP-5 zur Zusammenfassung der Ergebnisse der Messkampagnen.

M-2: Nach Abschluss von AP-8 zur Vorstellung der Modellempfindlichkeiten.

M-3: Nach Abschluss von AP-7 zur Vorstellung der 4D-Wolkenanalyse

M-4: Nach Abschluss von AP-9 zur Vorstellung der 3D-Wolkenparametrisierung in HRM-SEWAB

M-5: Nach Abschluss von AP-10 zur Analyse der 4D-Wolkeneffekte und Bereitstellung der 3D-wolkenparametrisierung für die Wissenschaftsgemeinschaft

M-6: Nach Abschluss von AP-11 zur Bewertung welchen Einfluss die 4D-Bewölkung auf die Prognose von Wassertransporten hat

3.3 Zusammenarbeit mit Dritten

Entsprechend den Ausführungen im obigen Antrag ist dieses Projekt auf eine enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern angewiesen. Entsprechend den BMBF Vorgaben wurde diese im Vorfeld durch einen Kooperationsvertrag geregelt. Neben den direkt am Projekt beteiligten Gruppen gibt es weiterhin eine Zusammenarbeit mit dem sogenannten „Nordverbund“. In diesem losen Verbund haben sich Wissenschaftsinstitutionen aus dem Norden – Universitäten wie z.B. Hamburg, Bremen, Hannover und Forschungseinrichtungen wie AWI, MPI, GKSS – zusammengefunden, um ihre Kapazitäten gemeinsam zur Untersuchung von Wolken zu nutzen. Der Nordverbund wird sich auch an den Experimenten in Geesthacht (siehe AP-3 und AP-4) beteiligen.

Neben zusätzlichen nationalen Partnern besteht auch eine enge Zusammenarbeit mit internationalen Gruppen. Insbesondere ist hier die Deutsch-Kanadische Zusammenarbeit zu erwähnen, in der GKSS mit seinen Arbeitsgruppen Partikelmessungen (Frau Dr. Nagel), regionale Modellierung (Dr. Rockel) und Satellitenfernerkundung (Dr. Stuhlmann) im Verbund mit kanadischen Partnern bei AES, Toronto (Dr. Strapp), McGill University (Prof. Yau, Prof. Leighton) Messungen und Modellierung zusammenführt.

Die Radargruppe steht im ständigen Austausch mit US-amerikanischen und europäischen Partnern. Hier sind die engen Kontakte zu den Arbeitsgruppen Prof. Clothiaux und Prof. Ver-

linde (Pennsylvania State University), Prof. Mace und Prof. Sassen (Univ. of Utah) zu nennen. Gemeinsame Projekte werden mit Dr. Testud (Institut Pierre Simon Laplace; Paris) und Dr. Illingworth (Univ. Reading) durchgeführt.

Die im Rahmen des AFO2000 Verbundprojekts MODMEP entwickelten Algorithmen zur Beschreibung der Wolkenmikrophysik bieten in der zweiten Phase der AFO2000-Laufzeit die Möglichkeit, eine verbesserte Wolkenmikrophysik zur Verfügung zu stellen. Es ist geplant, dass sich 4DWOLKEN und MODMEP durch gegenseitige Teilnahme an Workshops stets über die aktuellen Entwicklungen in den Verbänden unterrichten. Ein späterer Einbau (2. Phase von AFO2000) von MODMEP-Mikrophysikmodulen in das Regionalmodell HRM/REMO erscheint daher sehr wünschenswert.

4 Erfolgsaussichten

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Das Projekt ist Teil des Verbundprojektes „4D-Wolken“ in dem neben verschiedenen Universitäten auch der Deutsche Wetterdienst mit eingebunden ist. Damit ist bei erfolgreichem Abschluss des Projektes eine schnelle Überführung der Ergebnisse in die operationelle Wettervorhersage gegeben.

Neben den wirtschaftlichen Auswirkungen einer verbesserten Wettervorhersage wird ein direkter Nutzen der Arbeiten in den Bereichen Luftfahrt und Telekommunikation erwartet. Die Vereisung von Flugzeugen wird als einer der wesentlichen Risikofaktoren der heutigen Luftfahrt angesehen. Die aus den Ergebnissen ableitbaren Aussagen zur Existenz und Lokalisierung von unterkühltem Wasser in der Atmosphäre können als Grundlage für verbesserte Verfahren zur Detektierung und Vorhersage von Vereisungsbedingungen dienen und damit der Luftfahrt eine effizientere Routenplanung ermöglichen.

In der Telekommunikation ist ein Verlangen nach immer höheren Trägerfrequenzen zu verzeichnen, zum Teil, um den eng besetzten herkömmlichen Frequenzbändern auszuweichen, zum Teil auch, um große Bandbreiten für z.B. Videosignalübertragungen zu ermöglichen. So besteht schon großes Interesse das Ka-Band zu nutzen. Bei diesen Frequenzen wird allerdings die Ausbreitung elektro-magnetischer Strahlung durch Wolkenwasser dämpfend beeinträchtigt. Somit ist die räumliche Verteilung und Struktur von Wasserwolken entlang von Ausbreitungspfaden von direktem Interesse für die Telekommunikationsindustrie.

4.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Das Risiko eines Fehlschlages für den von GKSS vorgeschlagenen Beitrag wird als gering eingestuft, da Beobachtungsmethoden und Modellsystem bereits erfolgreich eingesetzt wurden.

AVHRR Daten werden bei GKSS seit 1993 ohne signifikante Ausfälle durch Fehler oder Wartung sowohl der Empfangsanlage als auch des Archivierungssystems aufgezeichnet. Es besteht ein Risiko bezüglich des Startes und möglicher Fehler der Instrumente von ENVISAT. Dieses Risiko ist etwas geringer für MSG, da sechs Monate nach dem ersten Start MSG-2 in seine Umlaufbahn geschickt wird und gegebenenfalls bei einem Fehlschlag von MSG-1 sofort dessen Aufgaben übernimmt. Bei einer erfolgreichen Mission von ENVISAT und MSG ist die Datenverfügbarkeit bei GKSS über die beiden Projektvorschläge AO-ID 348 für ENVISAT und AO-ID 137 für MSG, die positiv begutachtet und von EUMETSAT und ESA ausgewählt wurden, gewährleistet.

Das bei GKSS betriebene Wolkenradar ist ein sehr komplexes und teures Gerät. Obwohl es seit 1996 ohne längere Störungen von GKSS betrieben werden konnte, verbleibt ein gewisses Risiko für einen Fehlschlag für ein solches Instrument. Im Falle eines Ausfallens zentra-

ler Komponenten muss man erwarten, dass die Reparatur langwierig und sehr kostspielig sein kann. Gelder für eine solche Situation stehen derzeit nicht gesichert zur Verfügung und müssen im Falle des Eintretens intern bei GKSS ausgehandelt werden.

Die vorhandene in situ-Partikelmesstechnik ist durch Leihgaben anderer Institute (MPIfM Hamburg, AWI) im Institut für Atmosphärenphysik z.t. mehrfach bzw. mit sich überlappenden Messbereichen vorhanden, so dass selbst im Falle eines Totalausfalls jederzeit Ersatz vorhanden ist. Die Datenqualität wird durch die langjährigen Erfahrungen bei der Anpassung der Sonden an das jeweilige Flugzeug und die sorgfältige Kalibrierung durch GKSS sichergestellt. Die technischen Erfolgsaussichten sind somit durch die Partikelmesstechnik nicht beeinträchtigt.

Die Modellkomponenten des HRM/REMO und SEWAB sind in den letzten Jahren in verschiedenen Projekten entwickelt und validiert worden, unter anderen in dem BMBF-Projekt "Bestimmung des regionalen Energie- und Wasserhaushaltes über dem Ostsee-Einzugsgebiet". Die dabei erarbeitete Expertise ist die Grundlage für eine erfolgreiche Anwendung der Modelle in diesem Projekt.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die in diesem Vorhaben erstellten Parametrisierungen inhomogener Bewölkung für Atmosphärenmodelle, die keine kleinskaligen Wolken auflösen können (z.B. Globalmodelle für Kurz- und Mittelfristvorhersage, sowie globale und regionale Klimamodelle), werden an die Betreiber solcher Modelle weitergegeben.

Gemeinsame Veröffentlichungen der Ergebnisse dieses Vorhabens mit den Partnern aus dem 4DWOLKEN-Projekt und aus CLIWA-NET sind angestrebt.

5 Literatur

- Ahrens, B., U. Karstens, B. Rockel and R. Stuhlmann, 1998:** On the validation of the atmospheric model REMO with ISCCP data and precipitation measurements using simple statistics. *Meteorol. Atm. Phys.*, **68**, 127-142.
- Albers, F., A. Reuter, U. Maixner, L. Levkov, E. Raschke, and I. Sednev, 1999:** Horizontal Inhomogeneities in Clouds and their Effect on Remote Particle Measurements, *Phys. Chem. Earth(B)*, **24**, 3, 197 – 202.
- Barkstrom, B.R., 1984:** The earth radiation budget experiment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **65**, pp. 1170-1185.
- Barker, H.W., and B.A. Wielicki, 1997:** Parameterizing grid-averaged longwave fluxes for inhomogeneous marine boundary layer clouds, *J. Atmos. Sci.*, **54**, pp. 2785-2798.
- Barker, H.W., G.L. Stephens, and Q. Fu, 1999:** The sensitivity of domain-averaged solar fluxes to assumptions about cloud geometry, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **125**, pp. 2127-2152.
- Buschmann, N. and F. Albers, 2000:** Spatial Inhomogeneities of Cirrus Clouds as Derived from In Situ Ice Particle Measurements, *Phys. Chem. Earth(B)*, **25**, 2, 77 - 81.
- Crains, B., A. A. Lacis, and B. E. Carlson, 2000:** Absorption within inhomogeneous clouds and its parametrisation in general circulation models, *J. Atmos. Sci.*, **57**, pp. 700-714.
- Coley, P.F., and P.R. Jonas, 1997:** The contribution of cloud inhomogeneities and droplet concentration to the albedo of broken cloud fields, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **123**, pp. 1931-1944.
- Danne, O., G.G. Mace, E.E. Clothiaux, X. Dong, T.P. Ackerman, and M. Quante, 1996:** Observing structures and vertical motions within stratiform clouds using a vertical pointing 94 GHz cloud radar. *Contr. Atmos. Phys.*, **69**, 229-237.
- Danne, O., M. Quante, D. Milferstädt, H. Lemke, and E. Raschke, 1999a:** Relationships between Doppler spectral moments within large-scale cirro- and altostratus cloud fields observed by a ground-based 95 GHz cloud radar. *J. Appl. Meteor.*, **38**, pp. 175-189.

- Danne, O., M. Quante, E. Raschke, and C. Weitkamp, 1999b:** Investigations of cloud layer base and top heights from 95 GHz radar reflectivity data. *Phys. Chem. Earth (b)*, **24**, 167-171.
- Darnell, W.L., W.F. Staylor, S.K. Gupta, N.R. Richey, and A.C. Wilber, 1996:** Surface radiation budget: A long-term global dataset of shortwave and longwave fluxes, *American Geophysical Union*, http://www.agu.org/eos_elec/95206e.html.
- Fujiyoshi Y, Quante M, Danne O, Raschke E, 1999:** Properties of Deep Stratiform Ice Cloud Revealed by 95 GHz Cloud Radar - A Case Study. *Contr. Atmos. Phys.*, **72**, 113-125.
- Graham, N.E., 1995:** Simulating recent global temperature trends, *Science*, **26**, pp. 666-671.
- Hollmann, R., J. Mueller, B. Rockel and R. Stuhlmann, 1999a:** Satellite retrieved clouds and the radiation budget in support of BALTEX regional studies, *Phys. Chem. Earth (B)*, **24**, pp111-115.
- Hollmann, R., J. Feng, H.G. Leighton, J. Mueller, and R. Stuhlmann, 1999b:** ScaRaB as a valuable tool for BALTEX and MAGS, *Adv. Space. Res.*, **24**, No 7, pp.955-958.
- Hollmann, R., J. Mueller, and R. Stuhlmann, 2000:** A regional Earth Radiation Budget derived with ScaRaB for validation purposes in BALTEX, *Phys. Chem. Earth (B)*, **25**, No.2, pp.69-72.
- Kandel, R.S., M. Viollier, P. Raberanto, J.Ph. Duvel, L.A. Pakhomov, V.A.Golovko, A.P. Trishenko, J. Mueller, E. Raschke and R. Stuhlmann, 1998:** The ScaRaB Earth radiation budget dataset, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, pp. 765-783.
- Karstens, U., R. Nolte-Holube and B. Rockel, 1996:** Calculation of the water budget over the Baltic Sea catchment area using the regional forecast model REMO for June 1993. *Tellus*, **48A**, 684-692.
- Lelieveld J. and P.J. Crutzen, 1991:** The role of clouds in tropospheric photochemistry, *Journal of Atmospheric Chemistry*, **12**, pp. 229-267.
- Lemke, H., O. Danne, M. Quante, E. Raschke, R.Girard, and P. Park, 1997:** Study on critical requirements for a cloud profiling radar. Final Report: ESTEC Contract No. 11327/94/NL/CN, European Space Agency/ESTEC, Noordwijk, Netherlands.
- Lemke, H., H. Okamoto, M. Quante, 1998:** Comment on error analysis of backscatter from discrete dipole approximation for different ice particle shapes [Liu, C.-L., A.J. Illingworth, 1997, *Atmos. Res.*, **44**, 231-241.]. *Atmos. Res.*, **49**, 189-197.
- Lemke, H., and M. Quante, 1999:** Backscatter characteristics of nonspherical ice crystals: Assessing the potential of polarimetric radar measurements. *J. Geophys. Res.* Vol. **104**, No. D24, p. 31,739-31,752.
- Levkov, L., B. Rockel, H. Kapitzka, and E. Raschke, 1992:** 2D meso-scale numerical studies of cirrus and stratus clouds by their time and space evolution. *Contib. Atmos. Phys.*, **65**, pp. 35-58.
- Liang, X., Wood, E.F., Lettenmaier, D.P., Lohmann, D., Boone, A., Chang, S., Dai, Y., Desborough, C., Dickinson, R.E., Duan, Q., Ek, M., Gusev, Y., Habets, F., Irannejad, P., Koster, R., Michell, K., Nasonova, O.N., Noilhan, J., Schaake, J., Schlosser, A., Shao, Y., Shmakin, A., Verseghy, D., Warrach, K., Wetzels, P., Xue, Y., Yang, Z.-L., and Zeng, Q., 1998:** The Project for Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase-2(c) Red-Arkansas River Basin Experiment: 2. Spatial and Temporal Analysis of Energy Fluxes. *Journal of Global and Planetary Change*, Special Issue: Coupling Land and Atmosphere, **19**, pp. 137-160.
- Lohmann, D., R. Nolte-Holube and E. Raschke, 1996:** A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parameterization schemes. *Tellus*, **48**, 708-721.
- Lohmann, D., Lettenmaier, D.P., Liang, X., Wood, E.F., Boone, A., Chang, S., Dai, Y., Desborough, C., Dickinson, R.E., Duan, Q., Ek, M., Gusev, Y., Habets, F., Irannejad, P., Koster, R., Michell, K., Nasonova, O.N., Noilhan, J., Schaake, J., Schlosser, A., Shao, Y., Shmakin, A., Verseghy, D., Warrach, K., Wetzels, P., Xue, Y., Yang, Z.-L., and Zeng, Q., 1998:** The Project for Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase-2(c) Red-Arkansas River Basin Experiment: 3. Spatial and Temporal Analysis of Water Fluxes. *Journal of Global and Planetary Change*, Special Issue: Coupling Land and Atmosphere, **19**, pp. 161-179.

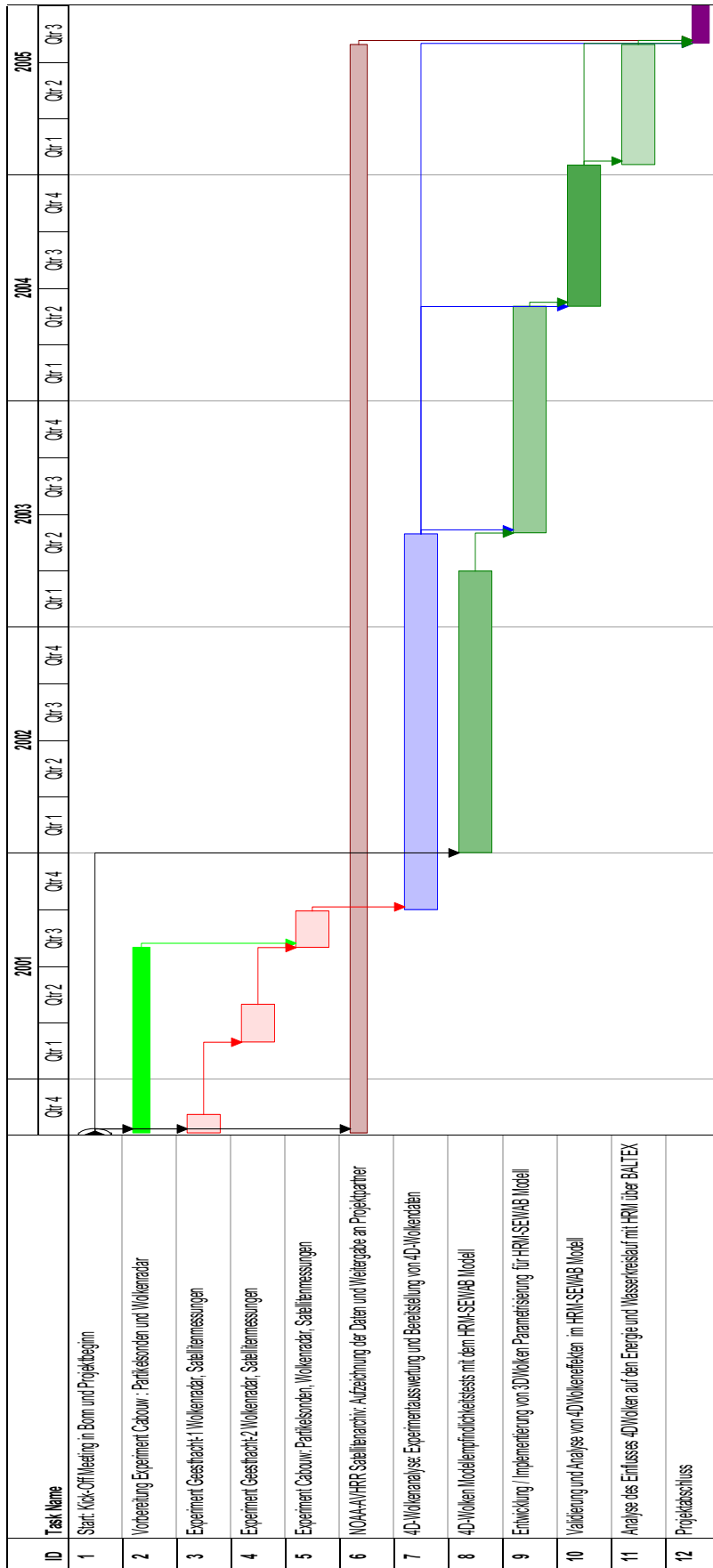
- Los A., M. van Weele, and P.G. Duynkerke, 1997:** Actinic fluxes in broken cloud fields, *JGR*, **102**, pp. 4257-4266.
- Masuda, K., T. Kobayashi, E. Raschke, F. Albers, W. Koch, U. Maixner, 1999:** Short-wave radiation flux divergence in arctic cirrus: a case study, *Atmos. Res.*, im Druck.
- Mengelkamp., H.-T., Warrach, K., and Raschke, E., 1999:** SEWAB - a parameterization of the Surface Energy and Water Balance for atmospheric and hydrologic models. *Advances in Water Resources*, **23**, pp. 165-175
- Müller, J., R. Stuhlmann, R. Becker, E. Raschke, J.-L. Monge, and P. Burkert, 1996:** Ground-based calibration facility for the Scanner for Radiation Budget instrument in the solar spectral domain, *Metrologia*, **32**, 657-660.
- Müller, J., R. Stuhlmann, R. Becker, E. Raschke, H. Rinck, P. Burkert, J.-L. Monge, and F. Sirou, 1997:** Ground characterization of the scanner for radiation budget (ScaRaB) flight model 1, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **Vol. 14**, No. 4, pp. 802-813.
- Müller, J., R. Stuhlmann, and R. Hollmann, 1999:** Comparison of ScaRaB narrowband visible channel with other satellite instruments, *Adv. Space Res.*, **Vol. 23**, No.8, pp.1425-1434
- Müller, J., R. Stuhlmann, K. Dammann, R. Hollmann, J.E. Harries, S. Kellock, R. Mossavati, R. Wrigley, D. Crommelynck, S. Dewitte, P. Allan, M. Caldwell, and E. Sawyer, 1999:** GERB: an Earth radiation budget instrument on second generation METEOSAT, *Adv. Space. Res.*, **Vol. 24**, No 7, pp.921-924.
- Noel, V., H. Chepfer, P.H. Flamant, M. Quante, O. Danne, V. Giraud, and J. Pelon, 2000:** Retrieval of particle sizes in cirrus clouds by active and passive remote sensing techniques: the 29 April and 14 May case studies of CARL. Submitted to *J. of Appl. Meteor.*
- Okamoto, H., A. Macke, M. Quante, E. Raschke, 1994:** Modeling of backscattering by non-spherical ice particles for the interpretation of cloud radar signals at 94 GHz. An error analysis. *Contr. Atmos. Phys.*, **68**, 319-334.
- Pereira, E.A., F.R. Martins, R. Stuhlmann, S.L. Abreu, P. Couto, and S. Colle, 1999:** Biomass burning controlled modulation of the solar radiation in Brazil, *Adv. Space. Res.*, **Vol. 24**, No 7, pp.971-975.
- Pereira, E.A., F.R. Martins, S.L. Abreu, P. Couto, R. Stuhlmann, and S. Colle, 2000:** Effects of burning biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil, *Solar Energy*, **68**, pp. 91-107.
- Quante, M., and D. O'C. Starr, 2000:** Dynamical processes in cirrus clouds: A review of observational Results. In: D. Lynch, K. Sassen, D.O'C. Starr, G. Stephens (eds.): *Cirrus*. Oxford University Press, New York, (*in press*).
- Quante, M., P.R.A. Brown, R. Baumann, B. Guillemet, and P. Hignett, 1996a:** Three aircraft intercomparison of dynamical and thermodynamical measurements during the PREUCREX campaign. *Contr. Atmos. Phys.*, **69**, pp. 129-146.
- Quante, M., O. Danne, E. Raschke, I. PopStefania, and A. Pazmany, 1996b:** Observations of cloud structure with a 3.2 mm-wave radar. Proceedings 12th International Conference on Clouds and Precipitation, Zürich, Schweiz, Vol. 1, 424-427.
- Quante, M., J.P.V. Poyares Baptista, and E. Raschke, (eds.), 1998a:** Synergy of Active Instruments in the Earth Radiation Mission. Proceedings of ESA/GKSS Workshop, 12.-14. November 1997, ESA EWP-1968, GKSS 98/E/10, 205pp, (ISSN 0344-9629).
- Quante, M., O. Danne, H. Lemke, D. Milferstädt und E. Raschke, 1998b:** Fernerkundung stratiformer Bewölkung mit einem 95 GHz polarimetrischen Dopplerradar. *Kleinheubacher Berichte*, **41**, 234-239.
- Quante, M., O. Danne, H. Flentje, W. Renger, and P. Francis, 1999:** Cloud boundaries and structure in mixed phase, mid-level clouds as deduced from ground-based 95 GHz radar and airborne lidar measurements during CLARE'98. ESA-ESTEC Report, WPP-170, 81-88.
- Raschke, E., F. Albers, G. Brogniez, M. Debois, P. Flamant, P. Francis, Y. Fouquart, J.-F. Gayet, H. Isaka, P. Jonas, R. Kandel, M. Quante, J. Ström, R. Stuhlmann, H. Sundquist and P. Wendling, 1997:** European Cloud and Radiation Experiment

- (EUCREX) - Final Report on the project EV5V-CT92-0130 EUCREX-2, **GKSS 97/E/8**, 155pp.
- Raschke, E., U. Karstens, R. Nolte-Holube, R. Brandt, H.-J. Isemer, D. Lohmann, M. Lobmeyr, B. Rockel and R. Stuhlmann, 1998:** The Baltic Sea Experiment BALTEX: A Brief Overview and some Selected Results of the Authors. *Surveys in Geophysics*, **19**, 1-22.
- Reuter, A. and S. Bakan, 1998:** Improvements of Cloud Particle Sizing with a 2D-Grey Probe, *Jour. Atmos. Oceanic Techn.*, **15**, 1196 – 1203.
- Rossow W. B., and R. A. Schiffer, 1999:** Advances in understanding clouds from ISCCP, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, pp. 2261-2287.
- Ryan, B.F., J.J. Katzfey, D.J. Abbs, C. Jakob, U. Lohmann, B. Rockel, L.D. Rotstajn, R.E. Stewart, K.K. Szeto, G. Tselioudis and M.K. Yau, 2000:** Simulations of a cold front by cloud-resolving, limited area and large-scale models, and a model evaluation using in-situ and satellite observations. *Mon. Wea. Rev.*, *in press*
- Schmetz, J., 1984:** On the parameterization of the radiative properties of broken clouds. *Tellus*, **36A**, pp. 417-432.
- Schrodin, R., G. Doms, W. Edelmann, E. Fischer, B. Frey, M. Gertz, A. Gube-Lenhardt, T. Hanisch, E. Heise, A. Link, D. Majewski, P. Prohl, B. Ritter, U. Schättler, 1995:** German Weather Service, Research Department, Documentation of the EM/DM-System.
- Soden, B.J., 1999:** The sensitivity of the tropical hydrological cycle to ENSO, *J. Clim.*, *in press*
- Sohn, B.-J., 1999:** Cloud-induced infrared radiative heating and its implications for large – scale tropical circulation, *J. Atmos. Sci.*, **56**, pp. 2657-2672.
- Starr, D. O’C., and M. Quante, 2000:** Dynamical processes in cirrus clouds: Concepts and models. In: D. Lynch, K. Sassen, D.O’C. Starr, G. Stephens (eds.): *Cirrus*. Oxford University Press, New York, (*in press*).
- Strapp, W., F. Albers, A. Reuter, A.V. Korolev, U. Maixner, E. Raschke, and Z. Vulkovic, 2000:** Laboratory Measurements of the Response of a PMS OAP-200X Probe, *eingereicht bei Jour. Atmos. Oceanic Techn.*
- Stuhlmann, R. and G.L. Smith, 1988a:** A study of cloud generated radiative heating and its generation of available potential energy. Part I: Theoretical background, *J. Atmos. Sci.*, **45**, pp.3911-3927.
- Stuhlmann, R. and G.L. Smith, 1988b:** A study of cloud generated radiative heating and its generation of available potential energy. Part II: Results for a climatological zonal mean January, *J. Atmos. Sci.*, **45**, pp. 3928-3943.
- Stuhlmann, R., B. Ahrens, U. Karstens, and B. Rockel, 1999:** ISCCP_DX products in support of BALTEX, *Adv. Space. Res.*, **Vol. 24**, No 7, pp. 949-954.
- Stuhlmann, R., 1999:** Satellite applications for energy budgets and the hydrological cycle, Ed. R. Stuhlmann, *Adv. Space. Res.*, **Vol 24**, , No 7, pp. 885-975.
- Weitkamp, C., H. Flint, W. Lahmann, F.A. Theopold, O. Danne, M. Quante, and E. Raschke, 1999:** Simultaneous radar and lidar cloud measurements at Geesthacht (53.5° N, 10.5° E). *Phys. Chem. Earth (B)*, **24**, pp. 163-166.
- Wood,E.F. , Lettenmaier, D.P., Liang, X., Lohmann, D., Boone, A., Chang, S., Dai, Y., Desborough, C.,Dickinson, R.E., Duan, Q., Ek, M., Gusev, Y., Habets, F.,Irannejad, P.,Koster, R., Michell, K., Nasonova, O.N., Noilhan, J., Schaake, J., Schlosser, A., Shao, Y.,Shmakin, A., Versegny, D., Warrach, K., Wetzal, P., Xue, Y., Yang,Z.-L., and Zeng, Q.,1998:** The Project for Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes (PILPS)Phase-2(c) Red-Arkansas River River Experiment:1.Experiment Description and SummaryIntercomparisons. *Journal of Global and Planetary Change*, Special Issue: Coupling Landand Atmosphere, **19**, pp. 115-136.
- Zhang, Y., B. Rockel, R. Stuhlmann, R. Hollmann, and U. Karstens, 2000:** REMO cloud modelling: Improvements and validation with ISCCP DX data, submitted to Journal of Applied Meteorology

6 Abkürzungen

AES	Atmospheric Environment Service
ARTIST	Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BALTEX	Baltic Sea Experiment
BRIDGE	The Main BALTEX Experiment, planned for 1999-2001
CARL	Cloud Analysis from Ground-Based and Airborne Radar and Lidar
CLARE	Cloud Lidar and Radar Experiment
CLIWA-NET	BALTEX Cloud Liquid Water Network
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	European Center for Medium Range Weather Forecast
ENVISAT	Environmental Satellite
ERBE	Earth Radiation Experiment
ERM	Earth Radiation Mission
ESA	European Space Agency
EUCREX	European Cloud and Radiation Experiment
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
EURICE	European Research for aircraft Ice Certification
FSSP	Forward Scattering Probe
GCM	General Circulation Model
GCSS	GEWEX Cloud System Study
GERB	Geostationary Earth Radiation Budget
GESIMA	Geesthachter Simulationsmodell der Atmosphäre
GEWEX	Global Energy and Water Cycle Experiment
HRM	High-resolution Regional Model
ICE	International Cirrus Experiment
ISCCP	International Satellite Cloud Climatology Project
MPI	Max-Planck-Institut
MSG	Meteosat Second Generation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration
OAP	Optical Array Probe
PIDCAP	Pilot Study for Intensive Data Collection and Analysis of Precipitation
PILPS2C	Project for Intercomparison of Land Surface Parameterization Schemes
PMS	Particle Measurement Systems Inc.
REFLEX	Radiation and Eddy Flux Experiment
REMO	Regionalmodell
ScaRaB	Scanner for Earth Radiation Budget
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SEWAB	Surface Energy and Water Balance Scheme
SVAT	Soil- Vegetation- Atmosphere- Transfer- Model
WCRP	World Climate Research Programme

7 Balkenplan



Antragsteller:

Dr. Klaus Pfeilsticker
Institut für Umweltphysik
INF 229
Universität Heidelberg
69117 Heidelberg

z. Zt.
NOAA/Aeronomy Lab
325 Broadway
Boulder, Co 80303
USA
email: pfeilsticker@al.noaa.gov
Phone: (303) 497-3735
Fax: (303) 497-5686

VORHABENS BESCHREIBUNG ZUM THEMA:

**4D Bewölkung der unteren Atmosphäre (4D Wolken):
Untersuchung der Photonenwegdichteweglängenverteilung des Streulichtes
bei bewölktem Himmel, sowie neuartige Untersuchung der typischen
räumlichen Skalierungseigenschaften bei unterschiedlicher Bewölkung**

1. Ziele**1.1 Gesamtziele des Vorhabens**

Im Rahmen des Vorhabens sollen die Weglängen solarer Photonen beim Durchgang durch die Erdatmosphäre vermessen werden. Weiter soll aufbauend auf Vorarbeiten (Savigny et al., 1999, 2000) die typischen räumlichen Skalen des atmosphärischen Strahlungstransportes und der Bewölkung mit Hilfe eines schnellen Vielkanalradiometers sowie mit neuen mathematischen Verfahren der Multifraktalitätsanalyse untersucht werden. Dieses Vorhaben dient somit dazu, Lücken in unserem Verständnis des atmosphärischen Strahlungstransportes zu schließen, die vor allem durch den fraktalen Charakter der Bewölkung in der Erdatmosphäre bedingt sind. Die Erkenntnisse dienen primär dazu, die möglichen Diskrepanzen zwischen modellierter und beobachteter atmosphärischer Strahlungsheizung durch die solare Strahlung zu klären. Dieses Ziel dient somit dazu, die Unsicherheiten des sogenannten Wolken'feed-back's in der Klimamodellierung zu reduzieren.

Für diese Forschungsvorhaben schlagen wir daher vor:

- die Messung der Photonenweglängenverteilung (des ersten und zweiten Momentes),
- die Ableitung des sogenannten Lévy-Indexes in Abhängigkeit der Bewölkungsart, atmosphärischen Zustandsgrößen und Sonnenstand, sowie eine Untersuchung über die 'Lokalitätseigenschaft' der abgeleiteten Photonenweglängenverteilung
- die Ableitungen der höheren Momente der Photonenweglängenverteilung durch neuartige (aber schon erprobte) Messungen einer größeren Anzahl (mind. 30) von Sauerstoff A Rotationsübergängen.
- die Charakterisierung der räumlichen Variabilität bzw. der Multifraktalität unterschiedlicher Bewölkung

- die Charakterisierung der typischen räumlichen Skalen des Strahlungstransportes in der bewölkten Atmosphäre durch Anwendung einer neuartigen multifraktalen Analyse der zeitlichen und räumlichen Variabilität des Himmelslichtes

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen (Förderprogramm)

Es besteht ein direkter Bezug zu **Thema I** der BMBF-Ausschreibung zum AFO 2000 Förderschwerpunkt: Unter 4. Aufgelistete Forschungsempfehlungen: „*Transportprozesse zwischen planetarer Grenzschicht und der freien Troposphäre unter besonderer Berücksichtigung von Wolkenbildung und Strahlungshaushalt*“ sowie „*Vertikalmessungen in der planetaren Grenzschicht und der unteren Troposphäre (... Flugzeuge,...)*“.

Ein weiterer Bezug besteht auf die Empfehlung im Konzeptpapier, die „*große, unverstandene Diskrepanz zwischen experimentellen Ergebnissen und der modellmäßigen Beschreibung*“ (S. 1, Ende zweiter Abschnitt) des Strahlungstransportes in der bewölkten Atmosphäre zu erklären.

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Folgende Arbeitsziele sind geplant:

Messung der Photonenweglängenverteilung bei unterschiedlicher Bewölkung

Ausgehend von den in der beantragenden Arbeitsgruppe in letzten Jahren gesammelten Erfahrungen Messungen der Photonenweglängenverteilung in der bewölkten Atmosphäre mit Hilfe der hochauflösenden Sauerstoff A-Bandenspektroskopie soll das der weltweit bisher einzigartige Meßverfahren verfeinert bzw. verbessert werden.

A1 technische Ziele:

Um diese weltweit herausragende Stellung der Arbeitsgruppe zu sichern, bzw. um die bisher noch bestehenden Defizite des bisherigen Meßaufbaues auszuschalten, soll ein Spektrometer mit

- (a) einer Verbesserung der spektralen Auflösung all bisher (FWHM/0.018 nm, in Zukunft 0.009 nm),
- (b) ein vergrößerter Spektralbereich (bisher 3 nm, in Zukunft 5 nm) sowie (c) eine Verbesserung der Meßempfindlichkeit

aufgebaut werden. Die technischen Ziele (a→c) werden durch den Einsatz einer hochempfindlichen CCD Kamera als Detektor eines neuen hochauflösenden Gitterspektrographen verwirklicht. Beide Geräte werden jedoch nicht aus Mitteln dieses Vorhabens beschafft. Die neue Apparatur soll jedoch mit Mitteln des Vorhabens in einem transportablen Container integriert werden, um ihren Einsatz bei den geplanten gemeinsamen Feldkampagnen (s.u.) zu vereinfachen bzw. zu ermöglichen.

A2 Wissenschaftliche Ziele:

Ausgehend von der verbesserten spektroskopischen Meßtechnik (s.o.) können folgende neue wissenschaftliche Ziele in Angriff genommen werden:

- Messung von Sauerstoff A-Bandenspektren mit verkürzten Integrationszeiten (30 s, bzw. etwa 300m räumliche Auflösung) die für die meiste Bewölkung unterhalb

der sogenannten `radiative smoothing scale`¹ liegen. Dadurch läßt sich z. Bsp. auch die Frage nach der `Lokalität` der Photonenweglängenverteilung bzw. des Lévy Stabilitätsindizes² (α) näher untersuchen.

- genauere Vermessung der Sauerstoff A-Bandenlinien - und somit der Photonenweglängenverteilung – aufgrund der wegen der höheren Auflösung - geringeren Korrekturen der gemessenen Spektren durch die Instrumentenspaltfunktion.
- Gleichzeitige Aufnahme einer größeren Anzahl (als bisher) von Sauerstoff A-Bandenlinien und somit die Möglichkeit höhere Momente der Photonenweglängenverteilungen zu untersuchen. Die Untersuchung einer größeren Anzahl von Momenten der Photonweglängenverteilung ermöglicht erstmals die Erforschung der Frage `ob bedingt durch die Multifraktalität des Generator (Wolken) die Antwortfunktion des Strahlungstransportes (Photonweglängenverteilung) auch multifraktale Eigenschaften besitzt, bzw. wie beide Eigenschaften miteinander verknüpft sind.
- Untersuchung der Photonenweglängenverteilungen, bzw. der höheren Momente der Photonenwege und des Lévy Stabilitätsindex α als Funktion der Bewölkung, i.e., ihrer Art und anderen Bewölkungseigenschaften wie liquid water path (Mikrowellengerät), liquid water content (Flugzeugmessungen), räumliche Ausdehnung (Wolkenradarmessung), etc..

Messungen der typischen räumlichen Skalierungseigenschaften der Bewölkung und des Strahlungstransportes

B1 Technische Ziele:

Im Rahmen des Vorgaben soll ein bestehendes Vielkanalradiometer zu einem flugfähigen Radiometer mit verbesserter zeitlicher Auflösung umgebaut werden, und auf einem im Rahmen des Vorhaben eingesetzten Flugzeug (Partner IFT/Leipzig mit Partenavia, oder IWW Berlin Cessna,) mit geflogen werden. Der Bau eines schnellen Vielkanalradiometers ist notwendig um einige Nachteile des bisherigen stationären Meßverfahren zu eliminieren. Die Nachteile des bisherigen Verfahren sind

- (1) keine exakte äquidistante Messung des Himmelsstreulichtes, da nur die Wolkendrift über den Meßort ausgenutzt wurde und daher
- (2) bei der Auswertung der Meßdaten von der Ergodie (Vertauschung von Zeit und Raum Dimension) des Problems ausgegangen wurde. Weiterhin war
- (3) mit einem stationären Radiometer nur eine räumliche Skala von der Größe Tageslänge mal Wolkendriftgeschwindigkeit (bestenfalls 500 km) vermeßbar, was eine eindeutige Untersuchung eines etwaigen Skalenbruchs in der Bewölkung im mesoskaligen Bereich nicht zuläßt.

Die technischen Ziele sind im einzelnen:

- Aufbau eines lichtstarken und flugfähigen Vielkanalradiometers mit einer `sampling rate` von mindesten 20 Hz (bisher 2 Hz).
- Einbau des Radiometers in die Cessna des IWW/Berlin oder die Partenavia/IFT Leipzig (muß noch vor Ort geklärt werden)

B2 Wissenschaftliche Ziele:

¹ Die `radiative smoothing scale` definiert die räumliche Skala unterhalb die Strahlungsübertragung deutlich weniger Variabilität zeigt als der Flüssigwassergehalt der Wolken. Für die meisten Strahlungsmessungen definiert sie deswegen eine untere Schranke für eine wünschenswerte räumliche Auflösung der Meßapparatur.

² siehe Pfeilsticker, K., JGR, 104, 4101 - 4116, 1999;

Durch den Bau eines schnellen Vielkanalradiometers können folgende neuen wissenschaftliche Fragestellungen detailliert untersucht werden:

- Messung der 'radiative smoothing scale' als Funktion der 'single scattering albedo' bei unterschiedlicher Bewölkung³
- Untersuchung der typischen Skalierungseigenschaften von Bewölkung, insbesondere soll die Frage eines 'mesoskaligen Skalenbruch' in der Wolkenbildung bzw. den darunterliegenden Prozessen untersucht werden.
- Multifraktalanalyse der räumlichen und zeitlichen Variation des Himmelstreulichtes⁴ und der LWC Messungen der Uni Bonn bei gleichzeitiger Analyse der durch Radar- und in-situ Messungen bestimmten Variabilität der Bewölkung.
- Klärung der möglichen Verknüpfung der Skalierungseigenschaften der Bewölkung und des Strahlungstransportes mit Hilfe eines MC Models (Zusammenarbeit mit Uni. Mainz).
- Messungen der Variabilität der Strahlungsfeldes innerhalb von Wolken und Vergleich mit dem in-situ gemessenen mit dem Wolkenflüssigwassergehalt (LWC).

2. Stand der Forschung, Eigene Vorarbeiten

2.1 Stand der Forschung

Der atmosphärische Strahlungstransport in und durch Wolken ist bis heute in großen Teilen noch mangelhaft verstanden. Ein für die Klimaforschung bedeutsames Problem sind hierbei die bestehenden Unsicherheiten in der Absorption der kurzwelliger Sonneneinstrahlung (0.3 - 4 micrometer) in der klaren bzw. in der bewölkten Atmosphäre (Stephens and Tsay, [1990], Cess et al., [1995], Ramanathan et al., [1995], Kerr, [1995], Pilewskie and Valero, [1996], Arking, [1996]). Neueste Untersuchungen zeigen dabei, daß zwischen der modellierten Energieabsorption (etwa 56 - 68 W/m²) und der beobachteten (aus GEBA/Global Energy Balance Archive Stationen etwa 89 W/m² bzw. mit dem ERBE-Satelliten (ERBE/Earth Radiation Budget Experiment) etwa 83 W/m²) abgeleitete solaren Strahlungsheizung der klaren und den bewölkten Himmel umfassenden Atmosphäre ('also all sky') eine große Diskrepanz besteht [Arking, 1996; Wild et al., 1996]. In diesem Zusammenhang sei auch das seit kurzem heftig debattierte Phänomen der 'Anormalen Wolkenabsorption' erwähnt. Es bezieht sich auf die Absorption der 'kurzwelligen' solaren Strahlung. bei dem ein an 25 W/ m² reichender Unterschied zwischen der beobachteten und der modellierte 'all sky' Heizungsrate diskutiert wird.

Die Ursachen einer möglichen anormalen Wolkenheizung sind bis heute noch nicht ansatzweise verstanden, siehe z.B. Ramanathan et al., [1995]; Imre et al., [1996].

Falls sich die bisher vorliegenden Beobachtungen bzgl. dieses Phänomens bestätigen, so müßte unsere Vorstellung vom Strahlungshaushalt der Erde und seine Repräsentation in Computermodellen des Erdklimas beträchtlich geändert werden. Dies hätte sicherlich auch erhebliche Auswirkungen auf die Vorhersage der bevorstehenden Klimaänderung [Wild et al. 1996].

Unklar ist hierbei insbesondere ob die erwähnten Diskrepanzen zwischen den Modellen und den Beobachtungen durch unbekannte Prozesse des Strahlungstransportes in der bewölkten Atmosphäre oder aber durch unbekannte Absorber bzw. Absorptionsmechanismen in der klaren und bewölkten Atmosphäre verursacht wird, Li et al., [1995; Arking, [1996]. Die eine

³ als single scattering albedo wird das Verhältnis 1 minus Quotient aus Extinktion durch Streuung und Gesamtextinktion (Streuung und Absorption) bezeichnet. Hier soll die single scattering albedo in Spektralbereichen bestimmt werden in der nur 'gaseous absorption' stattfindet.

⁴ see Savigny et al., 1999, and 2000

mögliche Erklärung für die großen Ungenauigkeiten in der Berechnung der solaren Strahlungsabsorption -

eben die schwierige bzw. fehlerhafte Beschreibung des atmosphärischen Strahlungstransportes bei inhomogener d.h. fraktaler bzw. durchbrochener Bewölkung - soll mit dem Vorhaben experimentell untersucht werden.

Neuere Forschungsarbeiten - die teilweise auch von den Antragstellern durchgeführt wurden - haben dabei gezeigt, daß der für die Absorption der kurzwelligen solaren Strahlung mitentscheidende atmosphärische Photonenweg u.a. von der fraktalen Dimension der Wolken abhängt; Cahalan et al., [1994a,b]; Marshak et al., [1995];

Davis et al., [1997] Davis and Marshak, [1998]; Borde et al., [1996]; Pfeilsticker et al., [1998a,b,c,d]; und Veitel et al., [1998b].

Eine Möglichkeit den Strahlungstransport in der bewölkten Atmosphäre besser zu charakterisieren, liegt in der Messung der Photonenweglängen bzw. ihrer Verteilung durch hochauflösende spektroskopische Messungen. Diese Idee wurde von den Antragstellern vorgeschlagen und in jüngster Vergangenheit intensiv verfolgt.

Dazu wurde von den Antragstellern die Methode der spektroskopisch hochauflösenden Messungen der Sauerstoff A-Bandenabsorptionen des im Zenit gestreuten Himmelslichtes entwickelt und erfolgreich eingesetzt [Erle et al., 1995; Funk, 1996; Pfeilsticker et al., 1997; Pfeilsticker et al., 1998a,b,c,d; Veitel et al., 1998; Wagner et al., 1998].

Weiterhin hat die bisherige Diskussion auch gezeigt, daß eine realistische Modellierung des Strahlungstransportes für die fraktale Bewölkung der Erdatmosphäre und damit eine Bestimmung der atmosphärischen Heizung durch die solare Strahlung bzw. der Photolyse zugrunde liegenden aktinischen Strahlungsflüsse schwierig ist. Einfache 'line by line' oder 'k-Distribution' Modelle für planparallele homogene Bewölkung beschrieben die Verhältnisse -- entgegen der verbreiteten Annahme -- nur unzureichend. Weiterhin sollten auch die Heizungsraten durch die kurzwellige solare Strahlung nicht nur von der mittleren Photonenweglänge sondern bei fraktaler Bewölkung von der Verteilung der Wege abhängen [Pfeilsticker, 1998a,d].

Ganz unabhängig davon ist es natürlicherweise auch unabdingbar solche Rechnungen durch entsprechende Feldmessungen zu validieren.

Die Unterschiede zwischen den Beobachtungen und Modellrechnungen der solaren Strahlungsabsorption in der Atmosphäre geben dabei auch zu der Vermutung Anlaß, daß vielleicht durch die in den Modellen üblicherweise gemachten Vereinfachungen wichtige Effekte der fraktalen Bewölkung nicht korrekt wiedergegeben werden.

Daher soll in diesem Forschungsvorhaben, ausgehend von den Meßergebnissen, mit einer von Davis und Marshak [1998] vorgeschlagene Parametrisierung der Photonenweglänge bzw. ihre Abhängigkeit von der Fraktalität der Bewölkung eingehend überprüft werden.

Weiterhin ist wegen des 'Principle of Equivalence' (das Prinzip besagt, daß der Strahlungstransport nur von der sogenannten 'single scattering albedo' aber nicht explizit von der Wellenlänge abhängt) eine Messungen der Photonenweglängenverteilung in der Erdatmosphäre, wie hier vorgeschlagen, offensichtlich eine der fundamentalsten Methoden um den Strahlungstransport in der Erdatmosphäre zu überprüfen [van de Hulst, 1980].

Weiterhin besteht zudem ein eigenständiges theoretisches Interesse an der zeitlichen/räumlichen Änderung der Streulichtintensität, die als eine fundamentale Eigenschaft des Strahlungstransports aufgefaßt werden kann (Austin et al., 1999; Cahalan et al. 1989; Cahalan et al., 1994 and 1994b; Davis et al., 1994 und 1997; Gabriel et al., 1988; Marshak et al., 1994, 1995 und 1997; Pierrehumbert et al., 1996). Gemeint ist hier ein Interesse an den fraktalen und multifraktalen Eigenschaften der Intensitätsvariation. So trägt die Untersuchung der statistischen Eigenschaften der Intensitätsvariation und deren Vergleich mit den Eigenschaften des Streuzentrendichtfeldes, zur Verbesserung des Verständnisses des Strahlungstransports in der terrestrischen Atmosphäre bei (Savigny et al., 1999 und 2000). Diese Anwendung ist insbesondere in der Klimamodellierung wichtig, da dort abhängig vom Model 'subgridkalige' Prozesse vernachlässigt werden, jedoch ein

Interesse in mittlere (oder höhere Momente davon) Eigenschaften, wie die solare atmosphärische Strahlungsabsorption, Wolkenalbedo und Transmission zum Boden besteht. Andererseits ist jedoch bekannt, daß die Größe der statischen Momente von multifraktalen Eigenschaften (wie die Bewölkung, oder die räumliche Variation des Strahlungstransportes) von der Kantenlänge (d.h. hier dem Grid im Klimamodell) der untersuchten Skala abhängen⁴. Ist daher von fundamentaler Natur die Skalierungseigenschaften der Bewölkung und des Strahlungstransportes zu kennen.

Eine andere Motivation für die hier vorgeschlagenen Messungen ist auch sie als Studienobjekt für statistische Strahlungstransportmodelle zu begreifen. So ermöglicht die Beobachtung, den Einfluß von Wolken mit (multi-)fraktalen Eigenschaften auf das Strahlungsfeld zu untersuchen. Gleichzeitige Messungen der vertikalen Flüssigwassergehaltssäule - ein Maß für die optische Dicke der Wolke - durch ein Mikrowellenradiometer lassen interessante Schlüsse über den Strahlungstransport zu. Die Photometermessungen stellen somit eine experimentelle Datenbank dar, mittels derer die Gültigkeit räumlich hochaufgelöster Strahlungstransportmodelle überprüft werden kann. Für eine theoretische Untersuchung ist eine auf der Monte-Carlo (MC) Methode beruhendes Modell geeignet (wie in dem Antrag angestrebt), das den Strahlungstransport durch realistische, mit einem multifraktalen Wolkenmodell erzeugte Wolken simuliert.

Der hier vorgelegte Antrag konzentriert sich auf eine statistische Charakterisierung der Datensätze mit neuartigen, sogenannten multifraktalen Analysemethoden. Eine Vielzahl geophysikalischer Prozesse ist geprägt durch nicht-lineare Dynamik, verbunden mit Instabilitäten, die zu hochgradig fraktalen Zeitabhängigkeiten führen können. Eine umfassende statistische Analyse sollte in solchen Fällen Methoden anwenden, die diesen Bedingungen angemessen sind. Das bedeutet insbesondere eine Quantifizierung von Fraktalität durch Bestimmung fraktaler Dimensionen. Durch die Anwendung klassischer statistischer Methoden wie Histogrammen oder Energiespektren ist eine Differenzierung zwischen Prozessen fundamental unterschiedlicher Natur häufig nicht möglich.

Histogramme lassen beispielsweise keine Aussagen über zeitliche/räumliche Korrelationen zu, spektrale Energiedichtefunktionen können für verschiedene Signale identisch sein. Um der immanenten Variabilität geophysikalischer Signale Rechnung zu tragen, die sich oft über viele Größenordnungen erstreckt, wurde von Marshak et al. (1994) und Davis et al. (1994) eine neuartige, sogenannte Bi-Multifraktale statistische Analysemethode vorgeschlagen. Die Methode vereint die aus der Turbulenztheorie bekannte Strukturfunktionsanalyse mit der Singularitätsanalyse. Diese multifraktalen Methoden ermöglichen eine Quantifizierung von Stationarität und Intermittenz der Datensätze. Dabei ist Stationarität die Invarianz statistischer, aus einem gegebenen Datensatz abgeleiteter Größen gegenüber Translation. Intermittenz impliziert, anschaulich gesprochen, ein singuläres Verhalten des Graphen im Sinne eines plötzlichen Auftretens von Funktionswerten, die extrem vom wahrscheinlichsten Wert abweichen (engl. spikyness).

Eine der wichtigsten bisherigen Anwendungen des Bi-Multifraktalen Ansatzes ist die Charakterisierung der multifraktalen Eigenschaften der Verteilung des Flüssigwassergehaltes (engl. Liquid Water Content, oder LWC) mariner Stratocumulusbewölkung (Marshak et al., 1997), sowie der multifraktalen Eigenschaften fraktaler Wolkenmodelle zur Simulation des LWC (Marshak et al., (1994). Eine realistische Modellierung terrestrischer Bewölkung muß die tatsächlichen Wolken insbesondere hinsichtlich der (multi-)fraktalen Eigenschaften möglichst gut reproduzieren. Die Anwendung der Bi-Multifraktalen Methode kann damit einen wichtigen Beitrag zur vollständigeren statistischen Beschreibung von Datensätzen und zur Feststellung der Güte theoretischer Modelle leisten.

Davis et al.(1994) forderten zudem die allgemeine Akzeptanz des vereinheitlichten Bi-Multifraktalen Konzepts als wissenschaftliches Protokoll zur Kommunikation zwischen

⁴ z. Bsp. hängt die Küstenlänge von Großbritannien von der Länge des Maßstabs ab (siehe z. Bsp. Mandelbrot, Fractals, 1977), jedoch falls die Küste ein Multifraktal wäre – was sie nicht ist -- würde sich ihre Länge nicht in der dort gezeigten trivialen Weise skalieren.

Theoretikern und Experimentatoren. Aufgrund der Vielseitigkeit der Methode, die sich prinzipiell auf jeden beliebigen skaleninvarianten, theoretischen oder empirischen Datensatz anwenden läßt, ist es vorstellbar, daß die Verwendung der Begriffe Stationaritätsparameter und Bi-Multifraktale Ebene in geraumer Zeit genauso geläufig sein wird wie die der Begriffe Standardabweichung und Normalverteilung. In dieser Hinsicht kann die vorliegende Antrag zur auch Verbreitung des neuartigen Konzepts beitragen.

Ein wesentlicher Aspekt dieser spektralen Charakterisierung ist also die Existenz eines Skalenbruches im Energiespektrum, der auf horizontale Photonendiffusion in Wolken zurückgeführt werden kann (e.g., Savigny et al., 1999). Man spricht in diesem Zusammenhang von Strahlungsglättung oder engl. 'Radiative Smoothing' (Marshak et al., 1995). Fraglich ist ob neben diesen Skalenbruch bei großen Wellenzahlen noch ein weiterer Skalenbruch bei kleinen Wellenzahlen prinzipiell vorliegen sollte, der auch auf einen Skalenbruch in den Wolkenbildungsprozessen hindeuten könnte (Austin et al., 1999; Savigny et al., 2000).

Wie oben dargelegt soll mit dem hier vorgeschlagenen Forschungsvorhaben soll der Einfluß des Strahlungsübertragung (Stichwort Photonenweglängen und Variabilität der Bewölkung bzw. der Strahlungsübertragung) auf die Absorption der solaren Strahlung in der bewölkten Atmosphäre eingehend untersucht werden. Das Forschungsvorhaben (wie auch schon der geleisteten Vorarbeiten) zielt daher auf die Gewinnung neuer Erkenntnisse zum Strahlungstransport in der bewölkten Atmosphäre und ist damit ein Beitrag zum besseren Verständnis der Absorption solarer Strahlung durch terrestrische Wolken und dient somit zur Verbesserung der Klimamodellierung.

Literatur zum Thema:

(Die eigenen Arbeiten sind in Kapitel 2.2 aufgeführt)

- Arking, A., Absorption of Solar Energy in the Atmosphere: Discrepancy between Model and Observation, *Science*, 273, 779, 1996.
- Austin, P., M. Szczodrak and G. Lewis, Spatial variability of Satellite-retrieved optical Depth and effective Radius in marine stratocumulus Clouds, 10th AMS Conference on Atmospheric Radiation, 1999.
- Cahalan, R., and J. Snider, Marine stratocumulus structure, *Remote Sens. Environ.*, 28, 95-107, 1989.
- Cahalan, R. F., W. Ridgeway, W. J. Wiscombe, and T. L. Bell, The albedo of fractal stratocumulus clouds, *J. Atmos. Sci.*, 51, 16, 2434, 1994a.
- Cahalan, R. F., W. Ridgeway, and W. J. Wiscombe, Independent Pixel and Monte Carlo Estimates of Stratocumulus Albedo, *J. Atmos. Sci.*, 51, 24, 3776, 1994b.
- Cess R. D., Zhang M. H., Minnis P., Corsetti L., Dutton E. G., Forgan B. W., Garber D. P., Gates W. L., Hack J. J., Harrison E. F., Jing X., Kiehl J. T., Long C. N., Morcrette J.-J., Potter G. L., Ramanathan V., Subasilar B., Withlock C. H., Young D and Zhou Y., Absorption of solar radiation by clouds: observations versus models, *Science* 267, 496-499, 1995.
- Davis, A., A. Marshak, W. Wiscombe, and R. Cahalan, Multifractal Characterizations of Nonstationarity and Intermittency in Geophysical Fields: Observed, Retrieved, or Simulated, *J. Geophys. Res.*, 99, NO. D4, 8055-8072, 1994.
- Davis, A., A. Marshak, R. F. Cahalan, and W. Wiscombe, The Landsat scale-break in stratocumulus as three-dimensional radiative transfer effect, implications for cloud remote sensing, *J. Atmos. Sci.*, 54, 241-260, 1997.
- Davis, A., and A. Marshak, Lévy kinetics in slab geometry: Scaling of Transmission probability, in *Fractal Frontiers*, edited by M.M. Novak, and T.G. Dewey, pp. 63-72, World Scientific (Singapore), 1998.
- Gabriel, P., S. Lovejoy, D. Schertzer, and G. L. Austin, Multifractal analysis of resolution dependence in satellite imagery, *Geophys. Res. Lett.*, 15, 1373-1376, 1988.
- Imre, D. G., E.H. Abramson, and P. H. Daum, Quantifying cloud-induced shortwave absorption: An Examination of uncertainties and of recent arguments for large excess absorption, *J. Appl. Met.*, 35, 1991 - 2010, 1996.
- Kerr R. A., Darker clouds promise brighter future for climate models, *Science* 267, 554, 1995.

- Li, Z., H. Barker, and L. Moreua, The variable effect of clouds on atmospheric absorption of solar radiation, *Nature*, 376, 486-490, 1995.
- Lovejoy, S., and D. Schertzer, Multifractals, universality classes and satellite and radar measurements of cloud and rain fields, *J. Geophys. Res.*, 95, 2021-2034, 1990.
- Lovejoy, S., J. Stanway, D. Sachs, D. Schertzer, B. Watson, Multifractal Modeling and Analysis of Radiation in Clouds: 5000 km to 50 cm, Proc. of the 7th ARM meeting, pp. 327 - 335, March 3-7, San Antonio (Ca), U.S. dep. of energy, 1998.
- Marshak, A., A. Davis, R. Cahalan and W. Wiscombe, Bounded cascade models as nonstationary multifractals, *Phys. Rev. E*, 49, 55-69, 1994.
- Marshak, A., A. Davis, W. Wiscombe, and R. Cahalan, Radiative Smoothing in Fractal Clouds, *J. Geophys. Res.*, 100, 26247-26261, 1995.
- Marshak, A., A. Davis, W. Wiscombe, and R. Cahalan, Scale invariance in liquid water distributions in marine stratocumulus. Part II: Multifractal properties and intermittency issues, *J. Atmos. Sci.*, 54, 1423-1444, 1997.
- Pierrehumbert, R. T., Anomalous scaling of high cloud variability in the tropical pacific, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 10, 1095-1098, 1996.
- Pilewskie P. and Valero F. P. J., How much solar radiation do clouds absorb ?, *Science* 271, 1131-1136, 1996.
- Quante, M., O. Danne, E. Raschke, I. Popstefanijia, and A. Razmany, Observation of cloud structure with a 3.2 mm-Wave Radar, Proc. of the 12th International Conference on Clouds and Precipitation, Vol. 1, 424 - 427, 1996.
- Ramanathan V., Subasilar B., Zhang G. J., Conant W., Cess R. D., Kiehl J. T., Grassl H. and Shi L., Warm pool heat budget and shortwave cloud forcing: a missing physics ?, *Science* 267, 499-503, 1995.
- Schertzer, D., and S. Lovejoy, Physical Modeling and Analysis of Rain and Clouds by Anisotropic Scaling Multiplicative Processes, *J. Geophys. Res.*, 92, NO. D8, 9693-9714, 1987.
- Stephens G. L. and Tsay S-C, On the cloud absorption anomaly, *Q. J. R., Meteorol. Soc.* 116, 671-704, 1990.
- Van de Hulst, Multiple light Scattering Vol. 1/2, Academic Press, New York, 1980.
- Wild, M., A. Ohmura, H. Gilgen, E. Roeckner, and A. Ohmura, Improved representation of surface and atmospheric radiation budget in the ECHAM 4 general circulation model, Report 200, MPI-Meteorologie, 1996.

2.2. Bisherige Arbeiten des Antragstellers

Die Antragsteller haben zur Beantwortung dieser Fragen eine neuartige, und bisher weltweit einzigartige spektroskopische Meßtechnik entwickelt [Funk, 1996; Pfeilsticker et al., 1998a,b,c,d; Veitel et al., 1998]. Die neue Meßtechnik beruht auf einer spektroskopisch hochauflösenden Analyse der Sauerstoff A-Banden Absorptionslinien (760 nm - 780 nm) im dem vom Himmelszenit gestreuten Sonnenlicht. Aus den gemessenen Sauerstoff A-Banden Linien lassen sich entweder die Momente (Mittelwert, Varianz, höhere Momente) der Photonenweglängenverteilung oder direkt - unter gewissen Annahmen - mit Hilfe einer sogenannten Laplacetransformation die Weglängenverteilung der solaren Photonen bestimmen. Wie die kürzlich durchgeführten Messungen zeigen [Pfeilsticker et al., 1998a,c,d; Veitel et al., 1998] hängt die Photonenlängenwegverteilung charakteristisch von der Bewölkungsart (Wolkentyp, räumliche Ausdehnung der Wolken usw.) ab. Weiterhin haben unsere Forschungen gezeigt, daß entgegen der bisherigen Annahme, die Photonenweglängenverteilungen in der i.a. inhomogenen (oder besser fraktalen) bewölkten Atmosphäre mit der bisher in der Umweltforschung wenig beachteten mathematischen Klasse der sogenannten der a-stabilen (im speziellen der sogenannten Klasse der Lévy-) Verteilungsfunktionen besser beschreiben lassen.

Weiterhin läßt sich vermuten, daß der Stabilitätsindex a der Verteilung von der fraktalen Dimension der Bewölkung abhängt. Da der Stabilitätsindex a der Verteilung die atmosphärischen Weglängen der solaren Photonen charakterisiert, ist er auch maßgeblich für die atmosphärischen Heizungsraten der eingestrahlten Sonnenstrahlung.

Der Antragsteller hat auf dem Gebiet der atmosphärischen Spektroskopie langjährige Erfahrungen. Sie sind national wie international durch entsprechende Forschungsarbeiten (siehe unten) bekannt. Da das Verfahren auf der von den Antragstellern entwickelten differentiellen optischen Absorptionsspektrometrie (DOAS) aufbaut, sind bezüglich der technischen Durchbarkeit alle Voraussetzungen gegeben.

Von dem Antragstellern bzw. seiner Arbeitsgruppe wurden bisher zu dem Forschungsthema folgende begutachtete Publikationen verfaßt:

1. Erle F., Pfeilsticker K., and Platt U., On the influence of tropospheric clouds on zenith-scattered-light measurements of stratospheric species, *Geophys. Res. Lett.* 22, 2725-2728, 1995.
2. Kurz, C., Multifraktale und spektrale Charakterisierung der zeitlichen Variation Zenit-gestreuten Himmelslichts, Thesis, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg, 1998.
3. Pfeilsticker K., Erle F. and Platt U., Absorption of solar radiation by atmospheric O₄, *J. Atmos. Sci.*, 54, 7, 939, 1997.
4. Pfeilsticker K., Erle F., Funk O., Marquard L., Wagner T., and Platt U., Optical path modifications due to tropospheric clouds: Implications for zenith sky measurements of stratospheric gases, *J. Geophys. Res.*, 103, 25323 - 25335, 1998.
5. Pfeilsticker, K., F. Erle, O. Funk, H. Veitel, and U. Platt, First geometrical path lengths probability density function derivation of the skylight from spectroscopically highly resolving oxygen A-band observations. 1. Measurement technique, atmospheric observations, and model calculations, *J. Geophys. Res.*, 103, 11483 - 11504, 1998c.
6. Pfeilsticker, K., First geometrical path lengths probability density function derivation of the skylight from spectroscopically highly resolving oxygen A-band observations. 2. Derivation of the $L\{e\}$ -index for the skylight transmitted by midlatitude clouds, *J. Geophys. Res.*, 104, 4101 - 4116, 1999.
7. Pfeilsticker, K., B. Arlander, J. Burrows, F. Erle, M. Gil, F. Goutail, C. Hermans, B. A. Hoiskar, J.C. Lambert, U. Platt, J.-P. Pommereau, A. Richter, A. Sarkissian, M. Van Roozendaal, T. Wagner, and T. Winterrath, Intercomparison of the measured influence of tropospheric clouds on UV-visible absorptions detected during the NDSC intercomparison campaign at OHP in June 1996, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1169-1172, 1999.
8. Platt, U., L.C. Marquard, T. Wagner, and D. Perner, Corrections for zenith scattered light DOAS, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1759-1762, 1997.
9. Savigny, C., O. Funk, U. Platt, and K. Pfeilsticker, Radiative Smoothing in zenith-scattered skylight transmitted to the ground, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2949-2952, 1999.
10. Savigny, C., A. Davis, O. Funk, and K. Pfeilsticker, Multi-fractal characteristics of zenith-scattered skylight transmitted through optically thick clouds to the ground, *J. Geophys. Res.*, (submitted), 2000.
11. Veitel V., O. Funk, C. Kurz, U. Platt, and K. Pfeilsticker, Geometrical path length probability density function of the skylight transmitted by mid-latitude cloudy skies; Some case studies, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3355-3358, 1998.
12. Wagner T., Erle F., Marquard L., Otten C., Pfeilsticker K., Senne Th., Stutz J., and Platt U., (1996), Cloudy sky photon path lengths as derived from DOAS observations, *J. Geophys. Res.*, 103, 25307 - 25321, 1998.

3. Arbeitsprogramm

Der Antrag bezieht sich auf die Messungen von Photonenweglängen mittels der hochauflösenden Sauerstoff A-Bandenspektroskopie und der Untersuchung von typischen 4DWolken: Institut für Umweltphysik, Heidelberg

räumlichen Skalen der Bewölkung und des Strahlungstransportes. Beide Techniken sollen im Rahmen des Vorhabens auf Feldmeßkampagnen eingesetzt werden, die zusammen mit den anderen Antragstellern organisiert und durchgeführt werden.

3.1 Hochauflösende Sauerstoff A-Bandenmessungen

Die Messung der Photonenwege stellt praktisch die Umkehrung der bekannten DOAS-Methode (Differentielle Optische Absorption Spektrometrie) dar, bei der an Stelle der Messung unbekannter Absorberkonzentrationen (bei bekannten optischen Wege) werden hier bei bekannter Absorberkonzentrationen (des atmosphärischen Sauerstoffs) die unbekanntes Wege bestimmt. Derartige Messungen wurden in den letzten Jahren mit einem hochauflösenden Gitterspektrometer an den Rotationslinien der Sauerstoff A-Bande (760 nm - 780 nm) am Institut für Umweltphysik/Universität Heidelberg erfolgreich durchgeführt [Funk, 1996; Pfeilsticker et al., 1998a,b,d; Veitel et al., 1998].

Wie die Autoren in den relevanten Publikationen dargelegt haben, läßt sich weiterhin bei einer Messung einer größeren Anzahl von Absorptionslinien mit unterschiedlicher Absorptionsstärken unter gewissen Annahmen der erste und zweite Moment (Mittelwert und Varianz) der Photonenweglängenverteilung bestimmen. Weiterhin haben neue Messungen des Autors [Pfeilsticker, 1999] sowie theoretische Überlegungen von Davis und Marshak [1998] gezeigt, daß für optisch dichte Bewölkung der mittlere Photonenweglängen $\langle L_T \rangle$ des im Zenit gestreuten und zum Erdboden transmittierten Himmelslichtes eine Funktion der vertikalen Ausdehnung der Bewölkung (H_c), der mittleren freien Weglänge zwischen zwei Miestreueereignissen (λ_{Mie}), des sogenannten Asymmetriefaktors der Miestreuung (g), sowie des Stabilitätsindex ist. Ist speziellen zeigten die Untersuchungen, daß die unter der Annahme der Monofraktalität der Photonenweglängenverteilung die durch eine Lévyverteilung mit einem charakterischen Stabilitätsindex (α) beschreiben werden kann. Ausgehend von diesem Wissen gliedert sich der Arbeitsplan folgendermaßen:

3.1.1 Neuaufbau eines hochauflösenden Spektrographen

Die Messungen der Photonenweglänge wurden bisher von unserer Arbeitsgruppe weitestgehend⁵ mit einem vom MPI-CH/Mainz geliehenen Gitterspektrographen (Focallänge 125 cm) durchgeführt. Zusammen mit der Einsatz einer Diodenzeile mit einer individuellen Diodenbreite von 25 μm erlaubt dieser Gitterspektrograph die Messung der Sauerstoff A-Bande mit einer Auflösung (?/??) von etwa 42000. Mit diesen Messungen ließen sich bisher die ersten und zweiten Momente der Photonenweglänge in Abhängigkeit der Bewölkung messen (siehe z. Bsp. Pfeilsticker et al., 1998). Durch Einsatz der schon mit eigenen Mitteln beschafften hochempfindlichen CCD Kamera (Pixelbreite 13.5 picometer) kann die Auflösung auf etwa 90000 gesteigert werden (durch Verringerung der Spaltbreite, Durchsatzverlust ein Faktor 2) bei einer gleichzeitig gesteigerten Meßempfindlichkeit (durch Vergrößerung der Spalthöhe von derzeit 0.125 cm auf 0.25 cm, i.e. ein Empfindlichkeitsgewinn von einem Faktor 4). Andererseits besitzt die CCD Kamera ein wesentlich geringeres Ausleserauschen (etwa 2 e⁻/pixel, oder umgerechnet auf die Größe eines Diodenzeilenpixels 690 e⁻/Diodenzeilenpixelfläche, gegenüber etwa 25000 e⁻/Diode

⁵ Zusätzlich wurde in jüngster Zeit ein neues feldgängiges Gitterspektrometer entwickelt und in Lindenberg/Brandenburg im Juni 1998, und in ARM/Oklahoma im März 2000 erfolgreich eingesetzt. Allerdings besitzen beide Spektrometer eine letztlich nur knapp ausreichende Auflösung von etwa 19 pm (notwendig wäre eine Auflösung ?/?? von ungefähr 170000), so daß die bisher verwendeten Gitterspektrographen einen Verlust an spektraler Information, bzw. durch den begrenzten Spektralbereich mit sich bringen, die es aber unmöglich machen die höheren Momente (größer als 2) der Photonenweglängenverteilung zu bestimmen.

der Diodenzeile) bei etwa gleicher Photonen zu Elektronenkonversionseffizienz. Da bisher das Signal zu Rauschverhältnis (S/N) durch das Ausleserauschen bestimmt wurde läßt sich bei erwünschtem gleichem (S/N) wie bisher die Meßzeit durch den Einsatz der CCD Kamera um mindestens einen Faktor $(4 \cdot \sqrt{25000}) / (2 \cdot \sqrt{690}) \approx 12$ verringern, bei einer gleichzeitig um einen Faktor 2 gesteigerten Auflösung. Das heißt auch bei gleichem S/N kann die Integrationszeit von heute 900 sec auf 75 sec verringert werden.

Der 1. technische Schritt ist daher den bisher benutzten Spektrographen mit der neu beschafften CCD zu betreiben, d.h. die CCD ist an den Spektrographen zu befestigen, zu justieren und die gelieferte CCD Treibersoftware für den geplanten Einsatz entsprechend umschreiben.

Da der ganze optische Meßaufbau sehr empfindlich auf mechanische Störungen reagiert und weiterhin etwa 550 kg wiegt (Spektrograph mit Thermostatisierung, CCD Kamera mit Steuerung, und optischer Tisch) und andererseits das Instrument bei Feldkampagnen eingesetzt werden soll, ist es äußerst ratsam in einem 2. Schritt den ganzen Meßaufbau fest in einen transportablen Container (siehe Antrag) zu integrieren.

Diese Arbeiten werden geschätzt (je nach Güte des Doktoranden) etwa 1 Jahr dauern und sollten zu Beginn der ersten Meßkampagne (im Sommer 2001) abgeschlossen sein.

In einem 3. Schritt ist die Teilnahme an zwei Feldmeßkampagnen vorgesehen, die mit den Partnern des Gemeinschaftsantrages zusammen organisiert werden.

3.1.2 Datenaufbereitung und Interpretation

Zusätzlich zu der bisher am IUP schon vorhandenen Auswertesoftware die auf einer 1024 Diodenzeilenpixeltechnologie basiert, muß die Auswertesoftware in einem 1. Schritt auf den vergrößerten Datenrahmen der CCD Kamera umgeschrieben werden. Dazu gehört insbesondere die Berücksichtigung der vergrößerten Pixelmenge (2500) eines Spektrums mit einer, entsprechend vergrößerten Spektralbereich und einer vergrößerten spektralen Auflösung, wie aber auch die korrekte Abbildung bzw. Koaddition der Pixel der sichelförmigen Abbildung des Fokus der Spektrallinie auf der CCD Kamera.

In einem 2. Schritt muß die nichtlineare Spektrenfitsoftware auf das neue Datenformat angepaßt werden.

In einem 3. Schritt gilt es die während der Meßkampagne gemessenen Spektren nach den unterschiedlichen Momenten der Photonenwege auszuwerten.

In einem 4. Schritt (Dateninterpretation) sollen die gemessenen und abgeleiteten Photonenwege bzw. ihre höheren Momente in Bezug auf die Messungen anderer wolkenphysikalischer Parameter (LWP, LWC, cloud top, bottom, type, etc) analysiert werden.

In einem 5. Schritt sollen die Meßdaten zusammen mit dem Antragsteller (Uni Mainz) mit Hilfe eines MC Modells interpretiert werden.

Die hier geschilderten Schritte 1 → 5 werden sicher große Teile der Projektjahre 2+3 in Anspruch nehmen.

Abschließend kann man sagen, daß die in Kapitel 3.1.1 und 3.1.2 geschilderten Arbeiten von Doktoranden am IUP routinemäßig durchgeführt werden, bzw. von wissenschaftlichen Personal betreut werden. Es sollten daher keine wesentlichen Schwierigkeiten bei den Arbeiten auftreten. Andererseits erfordert der Arbeitsaufwand jedoch, daß sich ein Doktorand ausschließlich um diese Arbeiten kümmert (siehe Kapitel 6.).

3.2 Untersuchung der typischen Skalierungseigenschaften der Bewölkung und des Strahlungstransportes

Die spektrometrischen Messungen werden mit selbstgebauten Radiometern am IUP seit 1998 routinemäßig durchgeführt und im Hinblick auf ihre Skalierungseigenschaften bzw. multifraktalen Eigenschaften untersucht, analysiert, und interpretiert (Savigny et al. 1999,

2000). Für die radiometrischen Messungen im Rahmen dieses Vorhabens werden zwei baugleiche schnelle, und flugfähige Radiometer benötigt, die von einem Doktoranden im Eigenbau aufgebaut und eingesetzt werden sollen. Im einzelnen fallen dabei in einem 1. Arbeitsschritt folgende Arbeiten an:

- Design und Bau der Radiometer
- Installation und Inbetriebnahme der Treibersoftware des schnellen ADC
- Integration in ein im Rahmen des Vorhabens eingesetzten Meßflugzeug

Die für die Analyse der Meßdaten notwendigen Software ist bereits vorhanden.

Die Schwierigkeit und Zeitwand dieser Untersuchung liegt in der theoretischen Interpretation der Meßreihen, die in einem 2. Arbeitsschritt von dem durchführenden Doktoranden in Angriff genommen werden soll. Die während den Feldmeßkampagnen am Boden aufgezeichneten gleichzeitigen Meßreihen von Streulichtradianz und Mikrowellendaten (LWP; Uni Bonn) sollen insbesondere bezüglich ihrer statischen Eigenschaften, wie 'roughness', Intermittenz und räumlichen/zeitlichen Skalierungseigenschaften untersucht werden. Die gleiche Analyse soll mit den während der Flugmeßkampagnen gewonnen Streulichtradianzdaten durchgeführt werden.

In einem 3. Arbeitsschritt sollen schließlich die gefundenen statischen Eigenschaften der Himmelsstreulichtradianzen einerseits

- im Hinblick auf die Mittelungsproblematik des Strahlungstransportes in Klimamodellen bezüglich einiger makroskopischer Eigenschaften von Bewölkung, wie der Art, Bedeckungsgrad, Wolkenalbedo, Absorption, und Transmission, usw. untersucht werden (zusammen mit IPA),

und andererseits

- sollen sie im Hinblick die typischen Skalierungseigenschaften der Wolkenbildung und des Strahlungstransportes untersucht und interpretiert werden.

3.3 Das ,working package 3200'

Der Antragsteller koordiniert das ,working package' 3200 STP-Validierung/Verbesserung – anomale Absorption im Rahmen des Verbundprojektes mit den beteiligten Institutionen (IfM, IPA, und IUP-HD).

Die Aufgaben dieses ,working packages' 3200 gliedern sich eigentlich in zwei Teilaufgaben: Untersuchung und Quantifizierung des Einflusses der Verteilung von Photonenweglängen auf die atmosphärische Absorption der solarer Strahlung sowie die Modellierung von gemessenen Sauerstoff A-Bandenspektren. Diese Teilaufgabe wird im Verbund zum einen mit diesem Teilprojekt (IUP-HD) näher untersucht (s.o.), und zum anderen durch umfangreiche Untersuchungen des Einflusses von Wolkenmorphologie und Wolkeninhomogenität auf die Strahlungsheizung mit Hilfe von MC Modellen des IPA und IFM sowie des SHDOM Modell des IPA's.

Im Verlauf dieses Vorhabens sollen diese beiden Ansätze folgendermaßen wechselwirken: Zum einen sollen mit den Modellen MC (Monte Carlo) und SHDOM des IPA's die Photonenweglängenverteilungen sowie die Strahlungsabsorption modelliert werden. Die Ergebnisse der MC und SHDOM Modellierung werden auch als Grundlage für eine theoretische Prüfung für das bei der Messung der Photonenweglängen notwendigerweise angenommene Funktional der PDF (probably density function)⁶ der Photonenwege dienen. Zum anderen soll man versucht werden, mit Hilfe zweier MC Modelle die gemessenen Sauerstoff A-Bandenspektren des Himmelstreulichtes zu modellieren (IfM).

⁶ üblicherweise wird bei planparalleler homogener Bewölkung davon ausgegangen, das die PDF durch eine Gammafunktion dargestellt werden kann. Diese Annahme ist aber bei inhomogener und durchbrochener Bewölkung i.a. nicht mehr gerechtfertigt (siehe z. Bsp. Davis and Marshak, 1998; Pfeilsticker, 1999)

Zum anderen ist Frage nach der atmosphärischen Absorption solarer Strahlung eine Frage nach den Absorbereigenschaften. Diese Frage kann aus Mittelgründen im Rahmen dieses Vorhabens nur am Rande tangiert werden, denn dazu sind einerseits umfangreiche spektroskopische sowie theoretische Arbeiten notwendig. Der Antragsteller ist jedoch im Rahmen anderer Verpflichtungen an solchen Forschungsarbeiten beteiligt, und die dabei möglicherweise entstehenden Ergebnisse werden in das beantragte Vorhaben einfließen.

Weiterhin sollen mit den SHDOM und Monte Carlo Modellen des IPAs die gemessenen Zenitradianzen des IUP-HD modelliert werden. Als Eingangsdaten dienen hierbei die bei den Meßkampagnen gleichzeitigen Messungen des LWP der Uni Bonn, sowie die mit dem Radar gemessenen Wolkenstrukturdaten der GKSS.

3.3 `Milestones`

Als Termin für den Projektbeginn wird der 1.10.2000 beantragt. Dieser Termin ist zeitkritisch, weil ansonsten die Vorbereitung des für August/September 2001 geplanten Feldexperimentes nicht mit der notwendigen Sorgfalt erfolgen kann. Der Termin für das Feldexperiment ist durch die Kopplung von 4DWOLKEN mit CLIWA-NET vorgegeben und kann nicht verschoben werden. Deshalb wird ein Projektbeginn am 1.10.2000 als vordringlich angesehen.

Erstes Förderjahr

Das erste Förderjahr wird hauptsächlich durch die Vorbereitung und (gegen Ende) durch das Feldexperiment in Holland (Cabauw) bestimmt (siehe Kapitel 3.1 und 3.1). Dafür ist eine intensive Abstimmung zwischen den bei 4DWOLKEN beteiligten Projektpartnern aber auch mit den Teilnehmern von CLIWA-NET notwendig. Absprachen müssen getroffen werden bzgl. der Meßstrategie, der Datenauswertung und des späteren Datenvergleichs und -austausches.

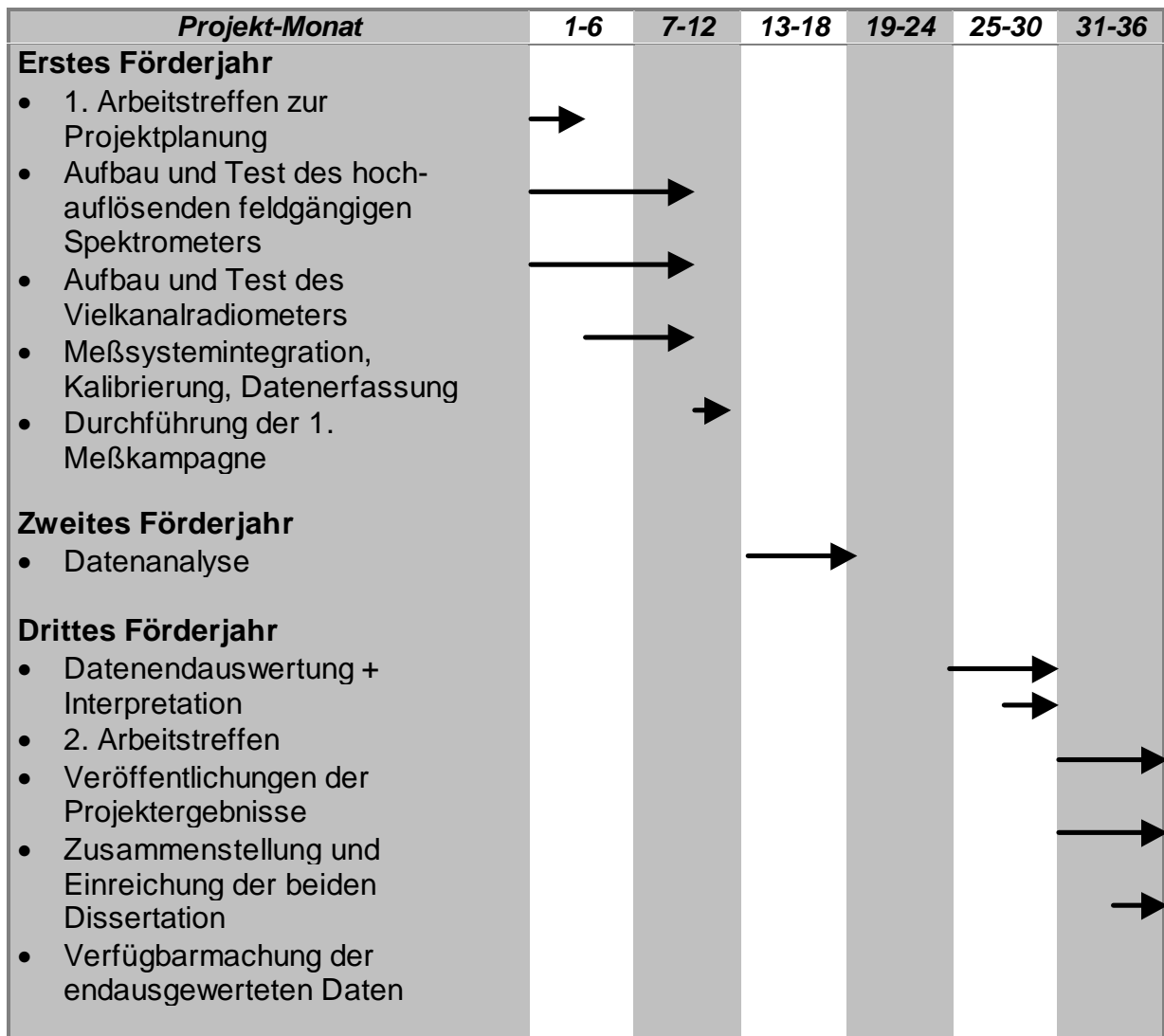
Zweites Förderjahr

Im zweiten Förderjahr liegt der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Auswertung der im Feldexperiment gewonnenen Daten und der Bereitstellung dieser für die anderen Projektteilnehmer.

Drittes Förderjahr

Im dritten Jahr der Förderung wird die Endauswertung der Daten, die Interpretation und Publikation der gewonnenen Ergebnisse im Mittelpunkt der Arbeiten stehen.

Balkenplan:



4. Verwertungsplan

4.1 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Angesichts der langjährigen Erfahrung bei der logistischen Planung und Durchführung von spektroskopischen Messungen bei zahlreichen Feldmeßkampagnen (z. Bsp. von Langpfadabsorptionmessungen und hochauflösende Sauerstoff A-Bandenmessungen des Himmelstreulicht vom Erdboden aus, spektroskopische Messungen vom Flugzeug/Transall, von stratosphärischen Ballonen, und vom Satellit/GOME aus) — dokumentiert in zahlreichen international begutachtet Publikationen des Antragstellers, kann man davon ausgehen, daß die geplanten Feldmessungen mit den teilweise überarbeiteten Apparaturen erfolgreich durchgeführt werden. Es ist mit einem verlässlichen Datensatz und seiner Interpretation zu rechnen.

4.2 Wissenschaftliche Anschlußfähigkeit

Im Rahmen des Forschungsvorhaben werden sicher zahlreiche neue wissenschaftliche Ergebnisse entstehen, die wie schon in der Vergangenheit in internationalen begutachteten

Zeitschriften publiziert werden (siehe Kapitel 2.2). Weiterhin dient das Forschungsvorhaben auch dazu eine Reihe interessanter Diplom- und Doktorarbeiten mit neuen Forschungsergebnissen zu erstellen. Selbstverständlich werden die gemeinsam entstandene Forschungsergebnisse der 4DWOLKEN-Partnern bzw. von Untergruppen bzw. teilweise an den Feldmeßkampagnen beteiligten CLIWA-NET Partnern auch gemeinsam publiziert.

5. Zusammenarbeit mit Dritten

Das beantragte Vorhaben ist Bestandteil des Verbundprojektes 4DWOLKEN. Die Zielstellung dieses Verbundprojektes kann nur in koordinierter Zusammenarbeit der beteiligten Forschungsgruppen erreicht werden. Der vorliegende Projektantrag trägt zu 4DWOLKEN hauptsächlich durch die Bereitstellung von Messungen der Photonenweglängenverteilung, sowie der statistischen Eigenschaften der Bewölkung und des Strahlungstransportes bei. Diese Messungen werden von den anderen Teilnehmern an 4DWOLKEN benutzt als Eingabewerte für detaillierte mehrdimensionale Strahlungs- bzw. wolkendynamische Modellberechnungen.

Durch die angestrebte Kombination von 4DWOLKEN und CLIWA-NET werden weitere synergetische Effekte durch eine gezielte Zusammenarbeit zwischen beiden Projekten möglich. So können die Flugzeug-getragenen mikrophysikalischen Wolkenmessungen innerhalb des vorgeschlagenen Projektes zur Verifikation der Boden-gebundenen Flüssigwasserpfad (LWP) Messungen mit passiven Mikrowellensensoren innerhalb von CLIWA-NET benutzt werden. Auf der anderen Seite liefern die quasi-kontinuierlichen Mikrowellenmessungen vom Boden Angaben über die zeitliche Variation der mikrophysikalischen Wolkenparameter und damit über die mehrdimensionale Wolkenstruktur. Diese Information können u.a. dazu benützt werden die statischen Eigenschaften der LWP mit den Himmelsradianzen zu vergleichen, bzw. zu verknüpfen. Weiter können die Information über die Wolkenstruktur und Aufbau die mit den Radargeräten vermessen werden, als Eingangsdaten für die Interpretation der Photonweglängenmessungen dienen.

Darüber hinaus bestehen enge Kontakte zu international angesehenen Wissenschaftlergruppen, die auf dem Gebiet der Wolkenmikrophysik bzw. der Strahlungsmessungen und –berechnungen weltweit führend sind

- (1) Prof. Raschke (GKSS)
- (2) Prof. R. Guzzi, CNR Bologna, Italien
- (3) Prof. W. Wiscombe und A. Marshak, NASA, Goddard, USA
- (4) Dr. A. Davis, Los Alamos, USA
- (5) Dr. Susan Solomon, NOAA Boulder, USA
- (6) Dr. Rod Jones, Uni Cambridge, UK

PD. Dr. Thomas Trautmann und Barbara Früh
Institut für Physik der Atmosphäre (**IPA**)
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Becherweg 21
D-55099 Mainz
Tel.: 06131-39-22868
FAX: 06131-39-23532
email: trautman@mail.uni-mainz.de

PD Dr. Jürgen Steppeler
Deutscher Wetterdienst
Postfach 100465
D-63004 Offenbach
Tel.: 0228-73-5779
email: juergen.steppeler@dwd.de

Vorhabensbeschreibung zum Thema:

Modellierung des Strahlungstransports in 3D-inhomogener Bewölkung und die Entwicklung von Parametrisierungen Teilprojekt von 4DWOLKEN

1. Ziele

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Wolken beeinflussen und steuern jegliche Austauschprozesse zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre und zwischen nahezu allen Stockwerken der Atmosphäre. Diese Austauschprozesse sind durch eine sehr starke Kopplung zwischen der Dynamik und Thermodynamik und dem Strahlungstransport geprägt. Sowohl bezüglich der Dynamik als auch seitens der Strahlungseffekte liegen den gegenwärtig verwendeten Modellmodulen bestenfalls eindimensionale, d.h. die Vertikalstruktur betreffende und oft auch stationäre, Vorstellungen zugrunde. So liefert die Idealisierung horizontal homogener Wolkenstrukturen in der solaren Strahlungsbilanzierung eine systematische Überschätzung der Wolkenalbedo und eine entsprechende Unterschätzung der Transmission. Eine nicht minder wichtige Problematik betrifft die sehr kontrovers geführte Diskussion um die erhöhte solare Absorption der Wolken. Viele Befunde sprechen nämlich dafür, daß realistische, horizontal und vertikal inhomogene Bewölkung eine höhere Absorption solarer Strahlung aufweist als sie mit klassischen 1D-Strahlungstransportmodellen simuliert werden kann.

Zu einer zufriedenstellenden Beantwortung dieser Fragen kann man nur mit Hilfe einer detaillierteren Modellierung des gekoppelten Systems Strahlungstransport-Dynamik gelangen, bei welcher die gegenwärtig gemachten Vereinfachungen schrittweise durch eine realistischere Modellphysik ersetzt werden.

Für die Bereitstellung der Information für die Wolkenmorphologie sollen zum einen Modelle (mesoskalige Wolkenmodelle wie GESIMA/REMO und LM sowie mit Hilfe von LES-Modellen der bewölkten Grenzschicht) herangezogen werden, aus denen die optischen Eingabedaten für die 3D Strahlungstransportrechnungen gewonnen werden können. Von der experimentellen Seite können Informationen über die Variabilität von Wolkengeometrie und Wolkenwasser aus Radar- und Mikrowellenmessungen bei der Strahlungstransportmodellierung verwendet werden. Diese Messungen sind unverzichtbar, da man nur durch sie direkte oder indirekte Information über die realen Wolkeneigenschaften erhalten kann.

Andererseits bilden die in 4DWOLKEN ausgeführten Messungen (Radar und Mikrowellen vom Boden, Strahlungsflussdichten, Strahldichten sowie aerosol- und wolkenmikrophysikalische Messungen vom Flugzeug und auch ergänzt durch Strahldichteinformation von Satelliten) die Grundlage, auf der die von den Modellen simulierten Strahlungsfelder überprüft werden müssen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Entwicklung von Parametrisierungsmethoden, mit denen die 3D-Effekte für den Strahlungshaushalt in mesoskaligen und regionalen Klimamodellen parametrisiert werden können. Letztlich spielt der Strahlungstransport eine zentrale Rolle für den Vertikaltransport (lokale Abkühlungs- und Erwärmungsraten) in der Atmosphäre.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Insbesondere wird Bezug genommen auf die Empfehlung der Ad-hoc Kommission, dass der Strahlungstransport in die Liste vorrangiger Themen der Atmosphärenforschung aufgenommen werden solle. Weiterhin werden im vorgeschlagenen Projekt die folgenden Förderziele in AFO2000 Punkt 2.A bearbeitet:

1. Vertikaltransport in der Troposphäre: Wechselwirkung zwischen Vertikaltransporten in der planetarischen Grenzschicht und dem Spurenstoff- und Wasserhaushalt, Transportprozesse zwischen planetarischer Grenzschicht und der freien Troposphäre unter besonderer Berücksichtigung von Wolkenbildung und Strahlungshaushalt.
2. Mehrphasenprozesse in der Troposphäre und Stratosphäre: Wachstum von Aerosolen und deren physico-chemische Modifikation durch Wolkenprozesse, Beeinflussung wichtiger Wolkenprozesse und -eigenschaften durch die Aerosole (Strahlungseigenschaften).

2. Motivation, Stand der Wissenschaft und Vorarbeiten

Experimentelle Befunde sprechen dafür, daß realistische Bewölkung eine höhere Absorption solarer Strahlung aufweist als sie mit 1D-Strahlungstransportmodellen simuliert werden kann (Cess et al., 1995; Ramanathan et al., 1995; Cess et al., 1996). Zwei unterschiedliche Gründe können nach heutigem Stand für diese Diskrepanz ins Feld geführt werden:

- 1) Die experimentelle Bestimmung der Absorption in einem finiten dreidimensionalen Gebiet stellt sehr hohe Anforderungen an die Messtechnik, da man die Absorption bislang nur durch Differenzbildung von Nettostrahlungsflussdichten ermitteln kann. Ist das Experiment nicht äusserst sorgfältig durchgeführt, so können sehr leicht falsche Schlüsse für die wolkeninduzierte Absorption gezogen werden (Stephens, 1996; Imre et al., 1996). Kritikpunkte sind u.a. Unsicherheiten in der Dateninterpretation, nicht zu vermeidende Messfehler und inkorrekte Methoden zur Ableitung der Absorption in einem atmosphärischen Volumen auf der Basis von Flugzeugmessungen.
- 2) Die angetroffene Bewölkung ist in hohem Maße zeitlich und räumlich variabel, so dass die 1D-Transporttheorie vom Prinzip her als unzureichend angesehen werden muss. Aus theoretischer Sicht bestehen zwei Lösungsansätze zur Erklärung der bislang in verschiedenen Feldexperimenten beobachteten Diskrepanzen zur horizontal homogenen plan-parallelen Theorie. Zum einen muss der Strahlungstransport ebenfalls als 3D-Problem behandelt werden, indem man realistische räumliche Verteilungen des Wolkenwassers verwendet. Dazu können einerseits Messungen (vom Boden, vom Flugzeug und von Satelliten) zur optischen Charakterisierung der Wolken verwendet werden. Zum anderen erscheint es sinnvoll, sowohl spektral fein aufgelöste Messungen als auch diese begleitende Simulationen auszuführen, um die spektrale Signatur der solaren Absorption in Wolken besser verstehen zu können.

Die Diskussion um die erhöhte solare Absorption der Wolken ist weltweit sehr kontrovers. Zwei Beispiele seien dafür angegeben: Zender et al. (1997) und Valero et al. (1997) fanden bei dem Atmospheric Radiation Measurements (ARM) Enhanced Shortwave Experiment (ARESE), dass ein bedeutender Anteil dieser Absorption bei sichtbaren Wellenlängen auftritt. Andererseits scheinen Messungen (Evans and Puckrin, 1996) und Simulationen (O'Hirok und Gautier, 1998b) zu unterstreichen, dass eine erhöhte Absorption eher im nahen Infrarot (3000-10000 1/cm) zu erwarten ist. Li et al. (1999) demonstrieren anhand einer sehr sorgfältigen Datenanalyse, die unterschiedlichste, sich ergänzende Messungen verwendete, dass die von Valero et al. (1997) und Zender et al. (1997) berichteten anomal hohen Wolkenabsorptionen nicht zweifelsfrei erscheinen.

Es kann somit aus heutiger Sicht festgestellt werden, dass man eine Klärung dieser Fragen nur durch zuverlässige und verfeinerte Messungen von Strahlung, Wolkenmikro- und makrophysik - durch direkte als auch indirekte Messungen - sowie eine begleitende detaillierte Simulation bewerkstelligen kann.

Die Modellierung des 3D Strahlungstransports in inhomogener Bewölkung ist in den letzten Jahren sehr weit vorangeschritten (Evans, 1998; O'Hirok und Gautier, 1998a,b; Trautmann et al., 1999). Die verwendeten Methoden basieren z.B. auf einer 3D-Erweiterung der Methode der Diskreten Ordinaten bzw. auf dem universell einsetzbaren Monte Carlo Verfahren für den Strahlungstransport. Diese Methoden sollen in dem hier vorgeschlagenen Projekt eingesetzt und weiterentwickelt werden.

Erste Ansätze zur Parametrisierung des Effektes von Wolkeninhomogenitäten auf den Strahlungstransport in grösserskaligen Modellen (Cairns et al., 2000) bestätigen, dass räumlich inhomogene Wolken mehr solare Strahlung absorbieren können als homogene Wolken mit gleicher vertikaler optische Dicke. Ferner wurde gezeigt (Varnai and Davies, 1999), dass man bereits eine deutliche Verbesserung für die Albedo von heterogenen Wolkenfeldern erhält, wenn man den Strahlungstransport in Analogie zur Independent-Pixel Approximation (IPA) beschreibt, jedoch die bei der IPA vertikal stehenden Säulen in der Richtung des direkten Lichtes neigt (Tilted Independent Pixel Approximation). Zwar erhält man dadurch dennoch keine Interaktion benachbarter geneigter Säulen, man kann jedoch den Effekt der Wolkenheterogenität auf das Strahlungsfeld wesentlich realistischer beschreiben.

2.1 Vorarbeiten

Zur Beantwortung obiger Fragen haben die Antragsteller einer Reihe wichtiger Vorarbeiten geleistet. Die räumlich mehrdimensionale Modellierung der solaren Strahlungstransportes wurde in feiner Wellenlängenaufösung im ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich mit einem Monte Carlo Verfahren sowie mit dem 3D-Transportmodell SHDOM in unbewölkter und bewölkter Atmosphäre ausgeführt (Trautmann et al., 1999). Diese Modelle können für die hier zu lösenden Aufgaben direkt verwendet und weiterentwickelt werden.

Ein weiterer Punkt betrifft die Bestimmung der optischen Eigenschaften von Aerosolpartikeln unter Berücksichtigung des Feuchtwachstums und diejenigen von Wolkentropfen (Früh et al., 2000a; Früh et al., 2000b). Die optischen Rechnungen werden benötigt, um die Strahlungseigenschaften wellenlängenabhängig spezifizieren zu können. Ferner wurden von den Antragstellern unterschiedliche Strahlungstransportmodelle mit Hilfe von Messungen des aktinischen Flusses, von Strahlungsflussdichten sowie mit Photolyseraten NO_2 und O^1D) aus unterschiedlichen Kampagnen im Rahmen des TFS validiert.

In einer weiteren Untersuchung werden gegenwärtig 3D-Effekte von Wolken im ultravioletten und im sichtbaren Spektralbereich untersucht (Früh, 2000).

Weitere Vorarbeiten, die im Herbst im Rahmen einer Diplomarbeit anlaufen werden, betreffen Algorithmen zur Bereitstellung der spektralen Transmission in der unbewölkten Atmosphäre (Gasabsorption in feiner Wellenlängenaufösung). In Form eines umfangreichen Datensatzes sollen spektroskopische Grössen unterschiedlicher Spurengase in feiner Wellenlängenaufösung für Strahlungstransportrechnungen bereitgestellt werden. Diese Daten können dann für die in 4DWOLKEN geplanten Arbeiten direkt weiterverwendet werden.

3. Arbeitsprogramm

Die zuvor aufgeworfenen Fragestellungen werden in unterschiedlichen Arbeitspaketen bearbeitet. Diese Arbeitspakete sind nachfolgend aufgeführt. Aus ihnen geht die Verzahnung des hier vorgeschlagenen Projekts mit den übrigen Verbundprojekten deutlich hervor. Die zeitliche Abfolge der einzelnen Arbeitspunkte ist im Abschnitt „**Zeitplanung**“ aufgeführt.

In den theoretischen Untersuchungen sollen die folgenden Problemkreise in unterschiedlichen Arbeitspaketen untersucht werden:

3.1.1 Modellentwicklung, -verifikation und Vergleich mit Messungen: - **Arbeitsphase 1** -

3.1.1a Strahlungstransportmodellierung in 2D, 3D im Solaren mit zwei unterschiedlichen Ansätzen:

Mit SHDOM und dem Monte Carlo Modell sollen spektral fein aufgelöste Simulationen ausgeführt werden, die mit Messungen (IfT Leipzig) der solaren Strahlungsflussdichten und mit spektroskopisch hochauflösenden Messungen zur Dichteverteilung der Photonenwege (IUP Heidelberg) verglichen werden sollen. Abhängig von der Wellenlänge soll der Absorptionseffekt unterschiedlicher Gase sowie von Tropfen und Aerosol detailliert berücksichtigt werden.

Das Monte Carlo Modell bietet gegenüber SHDOM den Vorteil, dass man jede noch so komplexe Wolkenstruktur darin abbilden kann. Optische Daten für Gase, Aerosol und Tropfen/Eis werden wie bei SHDOM vorgegeben, und es kann ebenfalls eine realistische Mie-Phasenfunktion beim Monte Carlo-Streuprozess simuliert werden. Beide Modelle erlauben es auch, dass man die Strahldichte ermitteln kann.

3.1.1b Strahlungstransportsimulation im Langwelligen

SHDOM kann ohne weitere Eingriffe direkt zur Simulation von Fluss- und Strahldichten im langwelligen Spektralbereich benutzt werden. Es ist jedoch wünschenswert, dass man - wie im Solaren - auch im Langwelligen eine Monte Carlo Methode als zusätzliche Referenz zur Verfügung hat. Hier soll in enger Kooperation (Projektpartner IfM Kiel) ein 'forward' (geeignet für Flussdichten) sowie ein 'backward' Monte Carlo Modell (für Strahldichten) entwickelt werden. Diese Modelle können in diesem Teilprojekt zur Simulation von Flussdichten und Strahlungsdivergenzen herangezogen werden.

Mit diesen exakten Transportmethoden sollen die folgenden Problemkreise und Fragen bearbeitet werden:

- Simulation von Reflexion, Transmission und Absorption in Grenzschicht- und Cumuluswolken in ausgewählten Wellenlängenbereichen. Vergleich dieser Strahlungstransportrechnungen mit Messungen (Projektpartner IfT Leipzig und TUD Dresden).
- Untersuchung der Variabilität des Wolkenwasser/eis-Gehaltes und deren Konsequenz für die Strahlungsbilanz der Wolke. (Vergleich inhomogene/homogene Wolke, independent pixel, horizontal homogen). Mit welchen Parametern kann man diese Variabilität am geeignetsten beschreiben und wie gross ist sie? (Partner IfM, MIUB, GKSS, IfT, FUB)
- Genaue Identifikation derjenigen Spektralbereiche, in denen Modell und Messung merkliche Unterschiede zeigen. Sensitivitätsstudien zur Ermittlung der Grössenordnung der 'enhanced cloud absorption'. Ist diese unterschiedlich für unterschiedliche Wolkentypen bzw. Wolkeninhomogenitäten? (Projektpartner IfT, FUB)
- Wie sieht der Strahlungshaushalt von 3D-Wolken im Langwelligen aus? Welche Methode ist effizienter, SHDOM oder Monte Carlo? Welchen Aufwand muss man im Langwelligen betreiben, wenn man davon ausgeht, dass in der Wolke annähernd isotrope Verhältnisse herrschen? Eventuell könnten sich die 3D-Effekte weniger dramatisch auswirken als im Solaren. (Projektpartner IfM, MIUB)

3.1.2 Parametrisierungsansätze: - **Arbeitsphase 2** -

Von besonderer Wichtigkeit ist die Entwicklung von Parametrisierungsansätzen für den Strahlungstransport in realistischen 3-dimensionalen Wolken. Dazu existieren bereits Überlegungen, die auf der Feststellung basieren, dass independent pixel Rechnungen (d.h.

Säule für Säule unabhängiger 1-D Transport) und die reine 1-D Theorie in hochauflösenden Klimamodellen (vgl. auch nichthydrostatisches Lokalmodell des DWD, horizontale Skala etwa 2 km) grosse Fehler erzeugen (Stichwort Schattenbildung, Reflexion zwischen Wolkenwänden, bodennahes Forcing für die Konvektion, falsche Energiebilanz am Boden, etc.). Somit ist es dringend geboten, Parametrisierungen zu entwickeln, die diese Effekte genauer als bisher möglich berücksichtigen können. Hierbei gilt es insbesondere zu beachten, dass die Parametrisierung nicht von der Wolkeninformation an einem einzigen Gitterpunkt ausgeht, sondern vielmehr die statistische Wolkenverteilung in einem noch zu definierenden grösseren Gebiet verwendet wird. Ein statistischer Ansatz erscheint deswegen unumgänglich, weil die Wolkenbildung in jedem Modell, so auch im LM, nur mit einer gewissen Unschärfe in Zeit und Raum vorhergesagt werden kann. Da im Verbund 4DWOLKEN viele Messungen und die dazu begleitenden Modellrechnungen ausgeführt werden, kann man mit diesem Datenmaterial sehr gut Parametrisierungsansätze entwickeln und testen.

Arbeitsphase 2 soll in enger Kooperation mit den Projekten zu den dynamischen Modellen (DWD, MIUB, GKSS) und Projekten zur Fernerkundung (TUD, FUB) durchgeführt werden.

3.2 Arbeitspakete mit Beteiligung des IPA

Arbeitspaket 3100 (koordiniert durch IfM)

In diesem Paket wird das Monte Carlo Strahlungstransportmodell MCC4 komplettiert für den kurzwelligigen und den langwelligigen Spektralbereich. Neben der Behandlung der Gase werden auch Aerosolpartikel und Wolkentropfen berücksichtigt. Ziel ist es, die optischen Eigenschaften der atmosphärischen Bestandteile spektral hochaufgelöst bereitzustellen, so dass Strahlungsrechnungen in ausgewählten Wellenlängenbereichen gezielt ausgeführt und später dann mit Messungen verglichen werden können. Die Arbeiten werden in enger Kooperation mit dem IfM durchgeführt.

Insbesondere sollen zwischen IPA und IfM die Algorithmen zur Bestimmung der Gasabsorption in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen verglichen und weiter optimiert werden.

Für die Gasabsorption stehen zwei Alternativen zur Verfügung: a) Feinbandige Rechnungen in ausgewählten Spektralintervallen, um die Messungen von IfT und IUP zu simulieren. b) Ein breitbandiges Integrationsschema auf Basis der k-Distributionsmethode (Fu and Liou, 1992; Fu et al., 2000), welches die über den solaren und langwelligigen Spektralbereich integrierten Strahlungsdivergenzen zu berechnen gestattet.

Modellentwicklungen betreffen die solare Strahlung (UV, sichtbar, nahes und fernes Infrarot) und die thermische Strahlung. Neben dem Monte Carlo Modell MCC4 des IPA steht gleichberechtigt auch das 3D-Strahlungsmodell SHDOM für die Simulationen zur Verfügung. Während im Solaren bereits sehr gute Übereinstimmung zwischen MCC4 und SHDOM dokumentiert werden konnte (Trautmann et al., 1999), bietet sich für infrarotes und thermisches Spektrum an dieser Stelle ein analoger Vergleich an.

Nach Abschluss des Pakets 3100 sollen vielfältig erprobte 3D-Strahlungstransportmodelle (Monte Carlo sowie SHDOM, d.h. auf Basis der direkten Lösung der Strahlungstransportgleichung) bereitgestellt werden. Von grosser Bedeutung ist die Kooperation mit den Verbundpartnern IfM und MIUB sowie die zwischen den Partner IfM und IPA durchzuführenden Modellvergleiche.

Die in diesem Teilprojekt erarbeiteten Strahlungstransportmodelle sind unabhängig von den Entwicklungen der anderen Partner IfM und MIUB. Sie dienen im vorgeschlagenen Projekt der exakten und parametrischen (Arbeitspakete s.u.) Behandlung von Strahlungsflussdichten in räumlich inhomogener Bewölkung für die Energetik der dynamischen Modelle. Diese

Arbeiten ergänzen sich mit den Modellentwicklungen der Partner IfM und MIUB, die sich mit der Modellierung der für die Fernerkundung zentralen Größe der Strahldichten befassen. Insofern widmen sich alle diese Modellentwicklungen jeweils disjunkten Aspekten des Strahlungsfeldes.

Arbeitspaket 3200 (koordiniert durch IUP)

Als Eingabedaten für die Wolkeninformation werden mit GESIMA (IfM) und LES (externe Kooperation mit A. Chlond, MPI für Meteorologie) simulierte Wolkenwasserfelder verwendet. Zu diesem Zeitpunkt soll gemeinsam mit dem IfM auch ein verlässlicher Algorithmus entwickelt werden, mit welchem die Bulk-Wolkenwasserinformation in repräsentative Größenverteilungen des Wolkenwassers für die anschließenden Mie-Rechnungen überführt werden kann (z.B. auf Basis des effektiven Radius; eine Validierung kann dann mit bereits existierenden und bei CLIWA-NET auszuführenden FSSP-Messungen des IfT durchgeführt werden).

Die experimentell ermittelten Daten zu Strahlungsflüssen (IfT) und mittleren Strahldichten in ausgewählte Raumwinkelbereiche (FUB) sollen zum Vergleich mit dem solaren Monte Carlo Modell herangezogen werden, um den Effekt von Wolkeninhomogenitäten untersuchen zu können. Es soll die Frage geklärt werden, ob die sich aus den Messungen ergebende Wolkenabsorption mit 3D-Strahlungstransportmodellen wiedergegeben werden kann (Stichwort anomale solare Absorption).

Einen weiteren Schwerpunkt bilden die spektroskopischen Messungen in der Sauerstoff-A-Bande (IUP), mit denen Aussagen über die Verlängerung der Photonenwege in realistischer 3D-Bewölkung gemacht werden können. Die Messdaten zur Photonenwegdichteverteilung sollen mit 3D-Strahlungssimulationen verglichen werden, um neue Einsichten in den solaren Strahlungstransfer bei bewölktem Himmel gewinnen zu können. Es ist zu vermuten, dass gerade die horizontale Wolkeninhomogenität zu längeren Photonenwegen führen kann, als dies bei horizontal homogenen Verhältnissen der Fall ist. Von der Modellseite bietet es sich an, die Zenitradianz der Himmelsstrahlung unter den bei CLIWA-NET vermessenen Wolken zu simulieren und die Ergebnisse dann mit den spektroskopischen Messungen des IUP zu vergleichen.

Grundlage der Strahlungstransportrechnungen bildet die realistische Spezifikation der Raum-Zeit-Abhängigkeit des Wolkenwassers (evtl. auch -eises), die aus den vielfältigen Messungen während des CLIWA-NET Experiments abgeleitet werden sollen. Alternativ dazu bieten auch die wolkenauflösenden Modelle der Verbundpartner IfM und GKSS sowie in externer Kooperation LES (A. Chlond) Eingabedatensätze, mit denen die optischen Eigenschaften der Wolken realitätsnah vorgegeben werden können.

Nach Abschluss des Pakets 3200 soll eine quantitative Bewertung der 3D-Strahlungseffekte zur Verfügung stehen, welche direkt in die nachfolgenden Arbeiten (Parametrisierung der 3D-Strahlung) einfließen soll.

Arbeitspaket 3300 (koordiniert durch IPA)

Der exakte 3D-Strahlungstransport ist bei weitem zu aufwendig, um in hochauflösende mesoskalige und regionale Klima- und Wettervorhersagemodelle direkt implementiert zu werden. Aus diesem Grunde soll in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) eine Parametrisierung der 3D-Strahlungseffekte entwickelt werden. Zunächst sollen die bei 4DWOLKEN gewonnen Messdaten und die exakten 3D-Simulationen der Strahlungsflussdichten dazu verwendet werden, um Parametrisierungsansätze, die aus einer Modifikation des 1D-Strahlungstransports gewonnen werden, zu testen und zu optimieren. Weitere Studien werden sich mit den mit GESIMA (IfM) oder LES (A. Chlond) generierten Modellwolken befassen.

Bisherige Erfahrungen mit 3D-Strahlungsfeldern (z.B. Trautmann et al., 1999) zeigten, dass man insbesondere durch eine realistischere Behandlung des direkt transmittierten sowie des

einfach gestreuten Lichtes zu entscheidenden Verbesserungen für die räumliche Verteilung der Strahlungsflussdichten kommen kann (Schattenbildung, Kulisseneffekte). Damit ist es dann möglich, für diese Vorhersagemodelle einen realistischeren dreidimensionalen dynamischen Antrieb zu formulieren.

Ferner soll dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Art und Weise, mit der die Modellumgebungen GESIMA/REMO (Gitterskala horizontal 0.1 - 100 km) sowie LM (Gitterskala horizontal etwa 2 km) die Wolken skalig (bzgl. der Geometrie und des zeitlichen Eintreffens der Bewölkung) vorhersagen, selbst eine räumliche und zeitliche Unschärfe aufweisen. Dies legt dann nahe, dass man diesen Antrieb auch eher statistisch als rein deterministisch formuliert. Die statistische Formulierung soll so verstanden werden, dass man den Antrieb in einer Modellgitterbox als Mittelung (Faltung) über umliegende Gitterboxen erhält. Mit Sensitivitätsstudien sollen dann die Konsequenzen dieses gemittelten Antriebes untersucht werden.

Nach Abschluss des Paketes 3300 wird eine Parametrisierung zur Verfügung stehen, die in den dynamischen Modellen LM und REMO/GESIMA verwendet werden soll (siehe nachfolgende Arbeitspakete).

Arbeitspaket 4100 (koordiniert durch IPA)

Die unter Paket 3300 entwickelte 3D-Parametrisierung soll in Kooperation mit dem DWD in das Lokalmodell LM implementiert werden. Gleichfalls werden entsprechende Arbeiten in Zusammenarbeit mit der GKSS im nicht-wolkenauflösenden REMO/GESIMA-Modellsystem ausgeführt. Insbesondere kommt es beim Routine-Vorhersagemodell LM auf die Rechenzeit an, so dass Strategien für eine Optimierung des Parametrisierungsschemas vorgeschlagen werden sollen.

Anhand von einfachen Teststudien soll ein erster Vergleich zwischen den Modellversionen "alt" (d.h. klassische 1D-Behandlung der Strahlung) und "neu" (3D-Strahlungsparametrisierung) durchgeführt werden. Im Zentrum der Untersuchung stehen hier beispielsweise der veränderte dynamische Antrieb und die Umwandlung der solaren Strahlung in thermische Strahlung am Boden (Effekt auf die Auslösung Konvektion am Boden). Weiterhin ist es beabsichtigt, mit diesen Teststudien den Einfluss der Strahlungsparametrisierung auf die Wolkenentwicklung an Einzelbeispielen zu ermitteln. Hilfestellungen zum Betrieb des LM werden durch die Partner DWD und MIUB geleistet.

Arbeitspaket 4200 (koordiniert durch TUD)

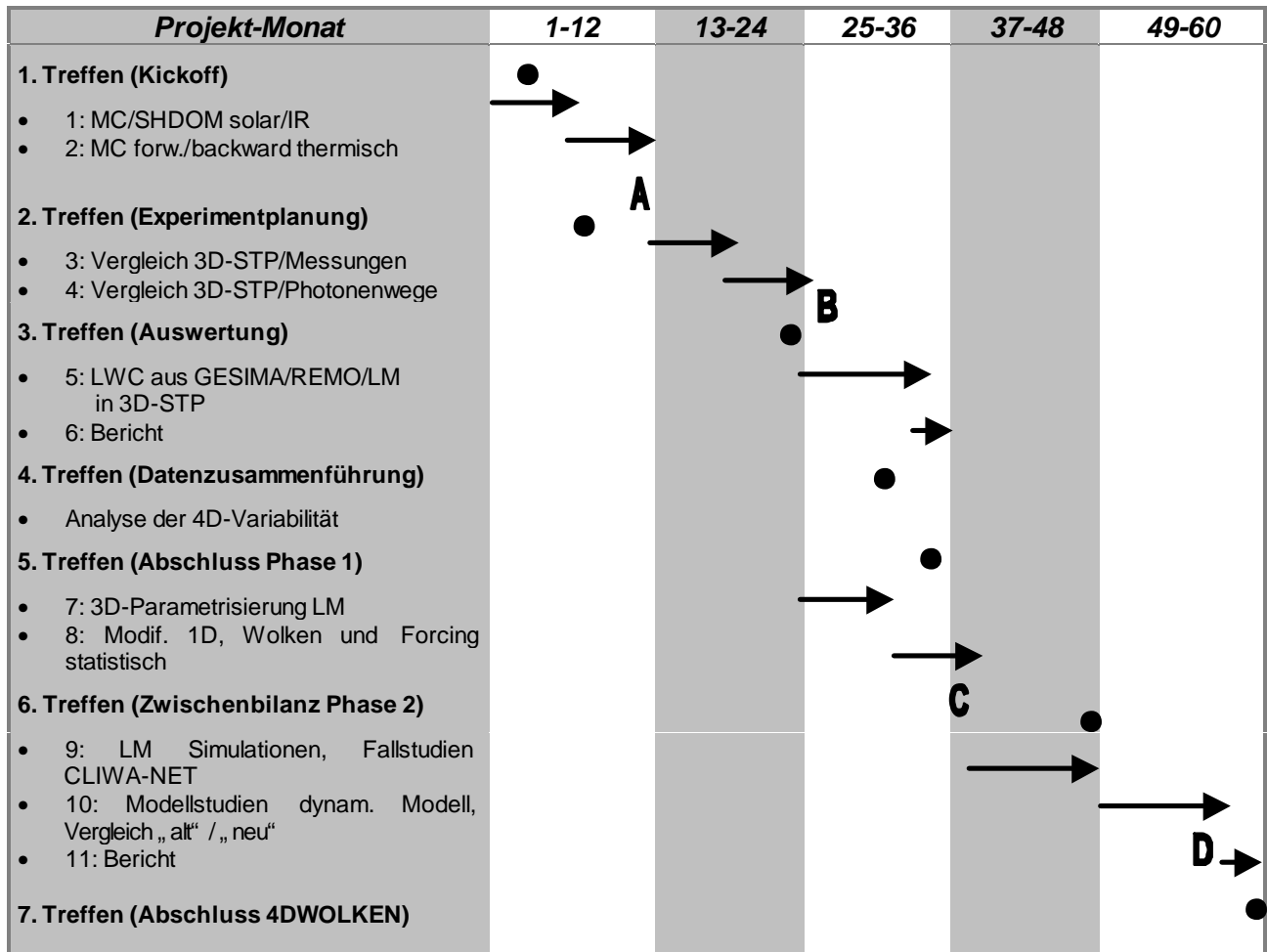
Dieses Paket widmet sich der Evaluierung/Validierung der mit den Modellen (3D-Strahlung "exakt" bzw. 3D-Strahlung "parametrisiert" in den dynamischen Modellen) ermittelten Strahlungseffekte mit Hilfe der bei CLIWA-NET ermittelten Messdaten sowie auf Basis der vom Satelliten aus bestimmbareren Strahlungseigenschaften realistischer 3D-Bewölkung. Die mit den Modellen REMO/GESIMA und LM berechneten Strahlungseffekte gilt es zu bewerten und mit Modellläufen, die die klassische 1D-Strahlungsparametrisierung verwenden, zu vergleichen. Die Basis dieser Bewertung soll nicht auf einer Einzelstudie beruhen, sondern es sollen vielmehr unterschiedliche Simulationsfälle ausgeführt werden, mit denen statistische Aussagen über die 3D-Strahlungseffekte und die sich daraus ergebenden Änderungen für die Dynamik gemacht werden können. Ausserdem sind Vergleiche Satellit-Modelle für eine Reihe von Terminen geplant, für welche keine in-situ Messungen (wie sie bei CLIWA-NET ausgeführt werden) zur Verfügung stehen.

Die Arbeiten des IPA konzentrieren sich auf die Validierung der Strahlungsflussdichten (Vergleich mit IFT-Messungen sowie dem statistisch-dynamischen Wolkenmodell der TUD) und der daraus abgeleiteten Erwärmungs- und Abkühlungsraten für die Dynamik. Demgegenüber befassen sich die Partner IfM und MIUB mit der für die Fernerkundung zentralen Grösse der Strahldichteinformation.

Eingabedatensätze und Unterstützung zum Betrieb des LM werden vom Partner DWD sowie mit Hilfe des Projektpartners MIUB zur Verfügung gestellt.

3.3 Balkenplan

Der folgende **Balkenplan** faßt die Meilensteinplanung (s. u.) für das beantragte Projekt zusammen:



Arbeitsetappen (Zeitraum in Monaten, M):

- 1: Komplettierung Monte Carlo Modell solar/IR (Gase, Aerosol), spektral fein aufgelöst, 6 M
- 2: Monte Carlo `forward/backward mode' im thermischen Spektralbereich, 6 M
- 3: CLIWA-NET: 3D-Strahlungstransport, Vergleich Simulation Messung, 6 M
- 4: Photonenwege: Vergleich Simulation/Messungen in O₂-A-Bande, 6 M
- 5: Wolkenwasser aus CLIWA-NET in REMO/GESIMA und LM: 3D-Strahlungseffekte, 10 M
- 6: Bericht für 1. Arbeitsphase, 2 M
- 7: 3D-Parametrisierung in LM, REMO/GESIMA: 1D-Säulen, Schatten, Kulissen, 8 M
- 8: Modifikation der 1D-Säulen-Betrachtung: Wolkeninformation und Forcing statistisch, 6 M
- 9: Test und Optimierung der 3D-Strahlungsparametrisierung im LM, Fallstudien, 10 M
- 10: Modellstudien LM, REMO/GESIMA: Vergleich der dynam. Modelle `alt' / `neu', 10 M
- 11: Bericht, 2 M

Meilensteine:

- A** - Komplettierung der exakten 3D Strahlungstransportmodelle für Flusssichten und Strahlungsdivergenzen
- B** - Vergleich 3D-Strahlung ``exakt`` mit CLIWA-NET
- C** - Parametrisierung von 3D-Strahlungseffekten in dynamischen Modellen
- D** - Modellstudien LM, REMO/GESIMA zur Wechselwirkung 3D-Strahlung mit der Dynamik

4. Verwertungsplan, Erfolgsaussichten und Anschlussfähigkeit

Die eingesetzten Methoden und Werkzeuge sind mehrfach erprobt, so dass das Risiko für ein Nichterreichen der geplanten Ziele sehr klein ist. Für die Implementation der vorgeschlagenen Modellerweiterungen stehen unterschiedliche Wege zur Verfügung.

Die geplanten Arbeiten tragen zu einem verbesserten Systemverständnis für die komplexe Wechselwirkung zwischen Strahlung und Dynamik der Atmosphäre bei. Die entwickelten Atmosphärenmodelle und Parametrisierungen sowie die bereitgestellten Daten dienen letztendlich einer verbesserten regionalen und globalen Klimamodellierung. Die in 4DWOLKEN erzielten Ergebnisse sind für die AFO2000-Verbundvorhaben EFEU und MODMEP von direkter Relevanz.

4.1 Bezug zum AFO2000-Verbund EFEU

Ein Informationszugewinn aus EFEU ist hinsichtlich einer realistischen Beschreibung optischer Eigenschaften des Aerosols zu erwarten, die dann für eine verbesserte Strahlungseigenschaften der unbewölkten Atmosphäre herangezogen werden kann. Demgegenüber wird das hier vorgeschlagene Verbundprojekt einen Beitrag zu EFEU liefern. Dort ist geplant, mit den hier entwickelten Modellen 3D-Effekte des Strahlungsfeldes auf die Dynamik in einer Biomass-Burning-Plume an einem realistischen Beispiel zu quantifizieren. Dieser Beitrag soll folgende wichtige Frage zu beantworten helfen: Ist der 1D-Strahlungstransport für die kleinräumige Simulation von Biomass-Burning ausreichend oder ist eine verbesserte Behandlung der Strahlung erforderlich?

4.2 Bezug zum AFO2000-Verbund MODMEP

Die im Rahmen des AFO2000 Verbundprojekts MODMEP entwickelten Algorithmen zur Beschreibung der Wolkenmikrophysik bieten in der zweiten Phase der AFO2000-Laufzeit die Möglichkeit, eine verbesserte Wolkenmikrophysik auch für hochauflösende mesoskalige Wolkenmodelle (horizontale Auflösung etwa 500 m) zur Verfügung zu stellen. Es ist geplant, dass sich 4DWOLKEN und MODMEP durch gegenseitige Teilnahme an Workshops kontinuierlich über die aktuellen Entwicklungen in den Verbänden unterrichten.

Ein späterer Einbau (2. Phase von AFO2000) von MODMEP-Mikrophysikmodulen in die von 4DWOLKEN genutzten dynamischen Modelle GESIMA, REMO/GESIMA und LM erscheint daher sehr wünschenswert.

4.3 Bezug zu geplantem Vorhaben CLOUDYA (DEKLIM)

Das vorgeschlagene Projekt hat eine sehr enge Verbindung mit dem von Herrn Dr. B. Mayer in DEKLIM geplanten Vorhaben im Teilbereich E "Three-Dimensional Radiative Transfer in the Cloudy Atmosphere: Model development and Implications for Climate and Remote Sensing (CLOUDYA)". Herr Mayer plant, ein universelles Monte Carlo Modell für den 3D-Strahlungstransport zu entwickeln, mit welchem unterschiedlichen für Energetik und Fernerkundung wichtigen Fragestellungen nachgegangen werden sollen. Hier ergeben sich vielfältige Anknüpfungspunkte und Modellvergleichsmöglichkeiten, von denen die Arbeiten in 4DWOLKEN Nutzen ziehen können.

5. Externe Kooperationspartner

1. Dr. Andreas Chlond, MPI für Meteorologie Hamburg
LES-Simulationen für die bewölkte Grenzschicht zur Vorgabe realistischer dreidimensionaler Wolkenwasserfelder.
2. Dr. Igor Podgorny, Scripps Institution for Oceanography, La Jolla, USA
Kooperation bezüglich generellen Problemen des Monte Carlo Strahlungstransportes (Flüsse, aktinische Flüsse, Behandlung realistischer Phasenfunktionen)
3. Dr. Michael A. Box, School of Physics, Univ. of New South Wales, Sydney, Australien
Diese Kooperation betrifft generelle Fragen zur Strahlungstransportmodellierung und zu optischen Eigenschaften und Strahlungseffekten von Aerosol und Wolken.
4. Dr. F.K. Evans, University of Boulder, Colorado, USA
Der Antragsteller setzt seit mehreren Jahren das 3D-Strahlungstransportmodell SHDOM, welches von Dr. Evans entwickelt wurde, für unterschiedliche Fragestellungen ein. SHDOM wurde von uns einem intensiven Vergleich mit dem in Kooperation mit Dr. Podgorny entwickelten Monte Carlo Modell MCC4 unterzogen. Die externe Kooperation mit Dr. Evans bietet die Möglichkeit zum gegenseitigen Erfahrungsaustausch beim Einsatz von SHDOM.

6. Zitierte Literatur

- Cairns, B., A. A. Lacis, and B. E. Carlson, 2000: Absorption within inhomogeneous clouds and its parameterization in general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 700-714.
- Cess, R. D., and Coauthors, 1995: Absorption of solar radiation by clouds - Observations versus models. *Science*, **267**, 496-499.
- Cess, R. D., M. H. Zhang, Y. Zhou, X. Jing, and V. Dvortsov, 1996: Absorption of solar radiation by clouds: Interpretations of satellite, surface, and aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, **101**, 23299-23309.
- Evans, K. F., 1998: The spherical harmonic discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 429-446.
- Evans, K. F., and E. Puckrin, 1996: Near-infrared spectral measurements of liquid water absorption by clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1941-1944.
- Früh, B., T. Trautmann, M. Wendisch, and A. Keil, 2000a: Comparison of observed and simulated NO₂ photodissociation frequencies in a cloudless atmosphere and in continental boundary layer clouds. *J. Geophys. Res.*, **105**, 9843-9857.
- Früh, B., T. Trautmann, M. Wendisch, 2000b: Measurement-based J(NO₂) sensitivity in a cloudless atmosphere under low aerosol loading and high solar zenith angle conditions. *Atmospheric Environment*, revised.
- Früh, B., 2000: Entwicklung und Evaluierung einer Modellhierarchie zur Simulation der aktinischen Strahlung in aerosolbelasteter und bewölkter Atmosphäre. Dissertation, zur Zeit angefertigt am Institut für Physik der Atmosphäre, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Fu, Q., and K.N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139-2156.
- Fu, Q., M. C. Cribb, H. W. Barker, S. K. Krueger, and A. Grossman, 2000: Cloud geometry effects on atmospheric solar absorption. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 1156-1168.

Imre, D. G., E. H. Abramson, and P. H. Daum, 1996: Quantifying cloud-induced shortwave absorption: An examination of uncertainties and of recent arguments for large excess absorption. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 1991-2010.

Li, Z., A. P. Trishchenko, H. W. Barker, G. L. Stephens, and P. Partain, 1999: Analyses of Atmospheric Radiation Measurement (ARM) program's Enhanced Shortwave Experiment (ARESE) multiple data sets for studying cloud absorption. *J. Geophys. Res.*, **104**, 19127-19134.

O'Hirok, W., and C. Gautier, 1998a: A three-dimensional radiative transfer model to investigate the solar radiation within a cloudy atmosphere. Part I: Spatial effects. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 2162-2179.

O'Hirok, W., and C. Gautier, 1998b: A three-dimensional radiative transfer model to investigate the solar radiation within a cloudy atmosphere. Part II: Spectral effects. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 3065-3076.

Ramanathan, V., B. Subasilar, G. Zhang, W. Conant, R. D. Cess, J. T. Kiehl, H. Grassl, and L. Shi, 1995: Warm pool heat budget and shortwave cloud forcing: A missing physics? *Science*, **267**, 499-503.

Stephens, G. L., 1996: How much solar radiation do clouds absorb? *Science*, **271**, 1131-1133.

Trautmann, T., I. Podgorny, J. Landgraf, and P. J. Crutzen, 1999: Actinic fluxes and photodissociation coefficients in cloud fields embedded in realistic atmospheres. *J. Geophys. Res.*, **104**, 30173-30192.

Valero, F. P. J., R. D. Cess, M. Zhang, S. K. Pope, A. Bucholtz, B. Bush, and J. Vitko, Jr., 1997: Absorption of solar radiation by the cloudy atmosphere: Interpretations of collocated aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, **102**, 29917-29927.

Varnai, T., and R. Davies, 1999: Effects of cloud heterogeneities on shortwave radiation: Comparison of cloud-top variability and internal heterogeneity. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 4206-4224.

Zender, C. S., B. Bush, S. K. Pope, A. Bucholtz, W. D. Collins, J. T. Kiehl, F. P. J. Valero, and J. Vitko, Jr., 1997: Atmospheric absorption during the Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Enhanced Shortwave Experiment (ARESE). *J. Geophys. Res.*, **102**, 29901-29915.

BMBF-Forschungsschwerpunkt *Atmosphärenforschung 2000*

Zeitliche Änderung der Feuchte- und Wolkenfeldstrukturen und deren Einfluß auf den Strahlungshaushalt, abgeleitet aus MSG und Envisat-AATSR Daten
-- Ein Beitrag zu 4DWOLKEN --

Laufzeit: 1.10.2000 bis 30.9.2005

Dr. Franz H. Berger
Technische Universität Dresden
Institut für Hydrologie und Meteorologie, Lehrstuhl Meteorologie
Piennerstraße 9, 01737 Tharandt
(berger@forst.tu-dresden.de)

1. Vorhabensbeschreibung

1.1 Gesamtziel

Ein entscheidender Teil für ein besseres Verständnis des Klimasystems, aber auch unseres Wetters ist die genaue Kenntnis des Energie- und des Wasserkreislaufes auf den unterschiedlichsten Skalen (von regional bis lokal, von Tagen bis Minuten/Sekunden). Zur Erweiterung bzw. Verbesserung des Verständnisses sind unbedingt gezielte Prozeßstudien erforderlich.

In diesem Projekt sollen Wechselwirkungen in der Atmosphäre bei wechselnden atmosphärischen Bedingungen mit verschiedenen Beobachtungsmethoden, hauptsächlich mit Satellitendaten, und mit Hilfe von eindimensionalen und dreidimensionalen Strahlungstransfermodellen bearbeitet werden. Darüber hinaus erlaubt der Forschungsverbund 4DWOLKEN eine eng abgestimmte Zusammenarbeit von Beobachtung und Simulationen mit Hilfe eines numerischen, atmosphärischen Modelles, um Prozeßstudien durchzuführen und um daraus folgernd die Prozesse besser verstehen zu können und gegebenenfalls die Parameterisierung der Prozesse im Modell verbessern zu können. Dazu sind aber unbedingt zeitlich hochaufgelöste und auch dreidimensionale Beobachtungen notwendig. Das hier beantragte Projekt zielt dabei auf drei Teilaspekte:

1. Die **Beobachtung der Atmosphäre mit den Wolken als starker Regulator** im Atmosphärensystem mit Hilfe aktueller (Meteosat, NOAA-AVHRR, ERS-1/2 ATSR) und zukünftiger Satellitendaten (Meteosat Zweite Generation – MSG und Envisat AATSR).
2. Die **Entwicklung eines Verfahrens** zur Bestimmung des zeitlich variablen, dreidimensionalen (vierdimensionalen) Feuchte- und Wolkenfeldes **aus der Synergie unterschiedlicher Satelliten- und Bodenbeobachtungen** bzw. aus der Beobachtung zweier zweidimensionaler Felder (horizontale und vertikale Information).
3. Der **Einfluß der Wolken** auf den **Strahlungshaushalt bei wechselnden atmosphärischen Bedingungen**.

Das hier beantragte 4DWOLKEN-Teilprojekt kann auch in Verbindung mit dem EU-Vorhaben CLIWA-NET damit Beiträge zu *GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment)*, einem WCRP (*World Climate Research Programme*) Programm, insbesondere aber für das GHP (*GEWEX Hydrological Panel*) und das GRP (*GEWEX Radiation Panel*) liefern und unterstützt somit auch nationale und internationale Aktivitäten zur Verbesserung der numerischen

Modellierung. Die in diesem Teilprojekt erzielten Ergebnisse sind darüber hinaus auch für die Entwicklung zukünftiger Forschungssatelliten der Europäischen Weltraumorganisation ESA (ESA Earth Explorer Earth Radiation Mission, ESA, 1999) nutzbar.

1.2 Bezug zum Förderprogramm

Mit dem hier beantragten 4DWOLKEN Teilprojekt *Zeitliche Änderung der Feuchte- und Wolkenfeldstrukturen und deren Einfluß auf den Strahlungshaushalt, abgeleitet aus MSG und Envisat-AATSR Daten* können im Rahmen des *Atmosphärenforschungsprogrammes 2000* die Kenntnisse über die lokalen und regionalen Wechselwirkungen des Energie- und Wasserkreislaufes verbessert werden. Dabei sollen die strahlungsrelevanten Prozesse einzelner atmosphärischer Schichten beobachtet, diagnostiziert und detailliert untersucht werden. Für die hier beantragte Untersuchung sollen Bodenmessungen der vertikalen Atmosphärenstruktur, insbesondere der Wolken- und Feuchtefeldeigenschaften, und flächenhafte Fernerkundungsmessungen zusammengeführt werden. Wesentlich erscheinen hierbei die adäquate Abbildung der dreidimensionalen Heterogenitäten sowie die daraus resultierenden Strahlungs- und Energieflüsse, die durch Wolken und die variablen Feuchtefelder induziert werden. Somit liefert dieses Teilprojekt Erkenntnisse für den Bereich *Verbesserung des Systemverständnisses der Atmosphäre* und zwar in Bezug auf den *Vertikaltransport in der Atmosphäre: Wechselwirkung mit Energie-, Wasser und Spurenstoffkreisläufe*.

1.3 Wissenschaftliche Arbeitsziele des Vorhabens

Das hier beantragte Vorhaben ist ein Teilprojekt des Verbundprojektes 4DWOLKEN. Die wissenschaftlichen Ziele des Forschungsprojektes lassen sich in folgende Schwerpunkte unterteilen:

- Bestimmung der optischen und mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften mit Hilfe aktueller und zukünftiger Satellitendaten
- Synergie der Messungen vom Boden mit den Messungen vom Satelliten und Entwicklung eines physikalisch basierten, statistischen Verfahrens zur Charakterisierung des drei- bzw. vierdimensionalen Feuchte- und Wolkenfeldes
- Analyse von Satellitendaten, Validierung der abgeleiteten Wolkeneigenschaften und gegebenenfalls Modifikation vorhandener Auswertemethoden
- Berechnung der Strahlungsflüsse in verschiedenen atmosphärischen Niveaus bzw. der Strahlungsflußdivergenzen in einzelnen atmosphärischen Schichten mit Hilfe eines dreidimensionalen Strahlungstransfermodelles
- Bereitstellung der Ergebnisse zur Validierung von Modellergebnissen numerischer Atmosphärenmodelle

Damit kann die Kenntnis über den Einfluß der Wolken auf den Strahlungs- und Energiehaushalt am Erdboden auf hohen zeitlichen und räumlichen Skalen verbessert und zugleich die Bedeutung der Wolken auf diesen Skalen demonstriert werden. Davon profitiert auf jeden Fall die Wolkenparameterisierung, die auf verschiedenen Skalen nur unzureichend ist. Dies hat insbesondere für die Wettervorhersage Bedeutung, kann aber auch für die Klimamodellierung genutzt werden. Dabei spielt die adäquate Abbildung der Heterogenitäten eine herausragende Rolle.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik, alternative Lösungen und Literaturangaben

Wolken spielen eine wesentliche Rolle im Strahlungs- und Energiehaushalt des Systems Erde / Atmosphäre. Somit sind sie schon seit vielen Jahren Gegenstand von zahlreichen Untersuchungen, die jedoch noch nicht ausreichen, um Wolken, insbesondere die Wolkenbildungsprozesse und deren Wechselwirkungen im System, auf kleinen Zeit- und Raumskalen hinreichend verstehen zu können. So gibt es besonders in den letzten Jahren vermehrt Aktivitäten, um den Einfluß der Wolken zu untersuchen und um ihn zum Teil kontrovers zu diskutieren (Anomale Absorption – Stephens and Tsay, 1990; Cess et al, 1995; Li and Moreau, 1996).

In den letzten Jahren lag ein Schwerpunkt auf der Bestimmung der Eigenschaften von Zirruswolken, wobei unterschiedliche spektrale Messungen vom Boden und vom Satellit durchgeführt wurden (Ackermann et al., 1990, Beck et al., 1996, Berger et al., 1989, 1996, Betancor und Graßl, 1993, Güldner und Spänkuch, 1999, Kinne et al., 1997, Kriebel, 1989, Kriebel et al., 1989, King et al., 1992, Platt et al., 1998, Spänkuch und Döhler, 1985, Spinhirne et al., 1996, Ou et al., 1995, Stone et al. 1990, Yi et al, 1990). Die Ergebnisse der Messungen wurden sowohl zum Vergleich als auch zur Modellvalidierung verwendet. Dabei zeigt es sich, daß sehr oft die mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften (effektive Tropfenradien bzw. effektive Eiskristalldurchmesser) falsch vordefiniert wurden. Diese Eigenschaften müssen daher unabhängig bestimmt werden. Eine Möglichkeit, mikrophysikalische Wolkeneigenschaften abzuleiten, ist die Nutzung zweier solarer Spektralkanäle (Nakajima and King, 1990, Nakajima et al., 1991, Nakajima and Nakajima, 1995). Als geeignet erscheinen die Reflexionsgrade bei 0.6 bzw. 0.8 μm und bei 1.6 bzw. 3.7 μm . Obwohl die Kombination des sichtbaren / nahen IR Kanals mit dem 3.7 μm Kanal nach den Modellberechnungen sehr gut Ergebnisse liefert, ist eine Anwendung auf Grund der sehr geringen Strahldichten problematisch. Diese Kanalkombinationen können aber sowohl für Wasserwolken, als auch für Eiswolken berücksichtigt werden (Berger, 1999, Baran et al., 1997, Halecker, 1998, Minnis, 1998, Watts, 1997). Diese Erkenntnisse können wiederum genutzt werden, um sie vereinfacht auf globale Datensätze anzuwenden (Han et al, 1998).

Zusätzlich zur Bestimmung der effektiven Tropfenradien und der effektiven Eiskristalldurchmesser können mit Kanalkombinationen im langwelligen Spektralbereich die unterschiedlichen Phasen (Eis und Wasser) bestimmt und untersucht werden (Ackermann et al, 1990, Giraud, 1997, Takano, et al, 1992, Minnis, 1998).

Neben den optischen und mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften können aus passiven Satellitendaten die Wolkenobergrenzen und die Eigenschaften am Oberrand einzelner Wolken bestimmt werden. Planungen für zukünftige Satellitensysteme, welche ergänzend aktive Radar und Lidarmessungen – ESA Earth Radiation Mission (ESA, 1999) -- berücksichtigen, zeigen das Potential zur Bestimmung der dreidimensionalen Wolkenstruktur auf (Illingworth, et al, 2000).

Ackerman, S.A., W.L. Smith, J.D. Spinhirne, and H.E. Revercombe. The 27-28 October 1986 FIRE IFO cirrus case study: Spectral properties of cirrus clouds in the 8-12 μm window. Mon. Weather Rev., 118:2377-2388, 1990.

Ardanuy, P.E., H.L. Kyle, and D. Hoyt. Global relationships among the Earth's radiation budget, cloudiness, volcanic aerosols, and surface temperature. J. Clim., 5:1120-1139, 1992.

Baran, A.J., P.D. Watts, J.S. Foot and D.L. Mitchell. Crystal size, shape and IWP retrieval using along track scanning radiometer observations of tropical anvil cirrus at 0.87 and 1.6 μm . IRS'96, 510-513, A Deepak, 1997

- Beck, G.H., J.M. Davis, and S.K. Cox. Radiative properties of cirrus clouds derived from surface interferometric measurements. *J. Appl. Meteor.*, 35:1240-1248, 1996.
- Berger, F.H., H.-J. Bolle, F. Fell and W. Wohlfahrt, 1989. Validation of cloud optical properties inferred from satellite measurements by ground based observations. *Adv. Space Research*, 9, 152-159, 1989.
- Berger, F.H., S. Jagdhuhn, B. Rockel, and R. Stuhlmann. Radiation Budget Components inferred from Meteorological Satellite Data. In *The 1996 Meteorological Satellite Data User's Conference*, Vienna, Austria, 16th - 20th September 1996, pages 335-344. EUMETSAT, 1996.
- Betancor M. and H. Graßl. Satellite remote sensing of the optical depth and mean crystal size of thin cirrus and contrails. *Theor. Appl. Climatol.*, 48:101-113, 1993.
- Cess, R.D., M.H. Zhang, P. Minnis, L. Corsetti, E.G. Dutton, B.W. Forgan, D.P. Barber, W.L. Gates, J.J. Hack, E.F. Harrison, X. Jing, J.T. Kiehl, C.N. Long, J.-J. Morcrette, G.L. Potter, V. Ramanathan, B. Subasilar, C.H. Whitlock, D.F. Young und Y. Zhou, 1995: Absorption of solar radiation by clouds: Observations versus models. *Nature*, 267, 496-499.
- Darnell, W.L., W.F. Staylor, S.K. Gupta, N.A. Ritchey, and A.C. Wilber. Seasonal variation of surface radiation budget derived from International Satellite Cloud Climatology Project C1 data. *J. Geoph. Res.*, 97:15741-15760, 1992.
- Eymard, L. und O. Taconet, 1995: The methods inferring surface fluxes from satellite data, and their use for atmosphere model validation. *Int. J. Remote Sensing*, 16 (11), 1907-1930.
- ESA, 1999: Earth Radiation Mission, Reports for Mission Selection, The Four Candidate Earth Explorer Core Mission, ESA SP-1233 (3).
- Evans, K.F., 1998: The Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method for Three-Dimensional Atmospheric Radiative Transfer, *J. Atmos. Sci.*, 55, 429-446.
- Fritz S. and K.P. Rao. On the infrared transmission through cirrus clouds and the estimation of relative humidity from satellites. *J. Appl. Meteor.*, 6(6):1088-1096, December, 1967.
- Giraud, V., J.C. Buriez, Y. Fouquart, F. Parol, and G. Seze. Large-scale analysis of cirrus clouds from AVHRR data: Assessment of both a microphysical index and the cloud-top temperature. *J. Appl. Meteor.*, 36:664-675, 1997.
- Güldner, J. und D. Spänkuch, 1999: Results of year-round remotely sensed integrated water vapor by ground-based microwave radiometry. *J. Appl. Meteor.*, 38, 981- 988.
- Halecker, T.. Ableitung von Wolkeneigenschaften für die Niederschlagsbestimmung (Meteosat Zweite Generation). Diplomarbeit T Dresden, Dezember 1998.
- Han, Q., W.B. Rossow, J. Chou, and R.M. Welch. Global survey of the relationships of cloud albedo and liquid water path with droplet size using ISCCP. *J. Clim.*, 11:1516-1528, 1998.
- Key, J.R, 1999: Streamer – User's Guide. Technical Report 96-01, Department of Geography, Boston University.
- King, M.D., Y.J. Kaufman, W.P. Menzel, and D. Tanre. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30:2-37, 1992.
- Kinne, S., T.P. Ackerman, M. Shiobara, A. Uchiyama, A.J. Heymsfield, L. Miloshevich, J. Wendell, E.W. Eloranta, C. Purgold, and R.W. Bergstrom. Cirrus cloud radiative and microphysical properties from ground observations and in situ measurements during FIRE 1991 and their applications to exhibit problems in cirrus solar radiative transfer modeling. *J. Atmos. Sci.*, 54:2320-2344, 1997.
- Kriebel, K.T., R.W. Saunders, and G. Gesell. Optical properties of clouds derived from fully cloudy AVHRR pixels. *Contr. Atmos. Phys.*, 62(3):165-171, 1989.
- Kriebel, K.T., Cloud liquid water path derived from AVHRR data using APOLLO. *Int. J. Remote Sensing*, 10(4 and 5):723-729, 1989.
- Laszlo, I. and R.T. Pinker. Shortwave cloud-radiative forcing at the top of the atmosphere, at the surface and of the atmospheric column as determined from ISCCP C1 data. *J. Geoph. Res.*, 98(D2):2703-2713, 1993.
- Li, Z. und L. Moreau, 1996: Alteration of atmospheric solar absorption by clouds: Simulation and observation. *J. Appl. Meteor.*, 35, 653-670.
- Li, Z., H.G. Leighton, K. Masuda, and T. Takashima. Estimation of sw flux absorbed at the surface from TOA reflected flux. *J. Clim.*, 6:317-330, February 1993.
- Mohan, M., Siddiqui, T.A., 1998: Applied modeling of surface fluxes under different stability regimes. *J. Appl. Meteor.*, 10, 1055-1067.
- Nakajima, T. and M.D. King, 1990: Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *J. Atmos. Sci.*, 47, 1878-1893.
- Nakajima, T., M.D. King, J.D. Spinhirne und L.F. Radke, 1991: Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part II: Marine stratocumulus observations. *J. Atmos. Sci.*, 48, 728-750.
- Nakajima, T.Y. and T. Nakajima, 1995: Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions. *J. Atmos. Sci.*, 52 (23), 4043-4059.
- Ou, S.C., K.N. Liou, Y. Takano, N.X. Rao, Q. Fu, A.J. Heymsfield, L.M. Miloshevich, B. Baum, and S.A. Kinne. Remote sounding of cirrus cloud optical depths and ice crystal sizes from AVHRR data: Verification using FIRE II IFO measurements. *J. Atmos. Sci.*, 52(23):4143-4158, 1995.
- Platt, C.M.R., S.A. Young, P.J. Manson, G.R. Patterson, S.C. Marsden, and R.T. Austin. The optical properties of equatorial cirrus from observations in the ARM pilot radiation observation experiment. *J. Atmos. Sci.*, 55:1977-1996, 1998.
- Schmetz, J.. Towards a surface radiation climatology: Retrieval of downward irradiances from satellite. *Atmospheric Research*, 23:287-321, 1989.

- Spänkuch, D. und W. Döhler, 1985: Radiative properties of cirrus clouds in the middle IR derived from Fourier spectrometer measurements from space. *Z. Meteorol*, 35, 314-324.
- Spinhirne, J.D., W.D. Hart, and D.L. Hlavka. Cirrus infrared parameters and shortwave reflectance relations from observations. *J. Atmos. Sci.*, 53(10):1438-1458, 1996.
- Stephens, G.L. und S.-C. Tsay, 1990: On the cloud absorption anomaly. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 116, 671-704.
- Stone, R.S., G.L. Stephens, C.M.R. Platt, and S. Banks. The remote sensing of thin cirrus cloud using satellites, lidar and radiative transfer theory. *J. Appl. Meteor.*, 29:353-366, May 1990.
- Takano, Y., K.N. Liou, and P. Minnis. The effect of small ice crystals on cirrus infrared radiative properties. *J. Atmos. Sci.*, 49(16):1487-1493, 1992.
- Watts, P.D.. Estimation of cloud droplet size, optical depth and phase from the Along Track Scanning Radiometer. *IRS'96*, 578-581, A. Deepak, 1997.
- Yi, H.C., N.J. McCormick, and R. Sanchez. Cloud optical thickness estimation from irradiance measurements. *J. Atmos. Sci.*, 47 (21), 2567-2579, 1990

1.5 Bisherige Arbeiten des Anbieters

Im Rahmen von BMBF-Forschungsprojekten zum Themenkreis *Strahlung und Wolken / Wasserkreislauf* konnten Methoden entwickelt und an einer Vielzahl von Datensätzen getestet werden, um aus Satellitendaten (NOAA-AVHRR und Meteosat) Strahlungsflüsse am Oberrand der Atmosphäre und am Erdboden abzuleiten. Dazu wurde ein modulares Auswerteschema aufgebaut, das durch geringfügige Modifikationen auch auf zukünftige Satellitendaten, wie Envisat oder Meteosat Zweite Generation, angepaßt werden kann. Das Auswerteschema (Berger, 2000) läßt sich in sechs Module unterteilen:

1. In dem ersten Modul existieren Programme für die *Vorbereitung der Satellitendaten*, wie die Eichung oder die Geokodierung. Dieses Modul nutzt die aktuellste Eichbeziehungen (Koslowsky, 1997, Rao und Chen 1998).
2. Im zweiten Modul, welches wiederum aus mehreren Einzelteilen besteht, werden die Wolken klassifiziert (Berger, 1992b, 1995a). Mit diesem Modul können 20 Wolkenklassen klassifiziert werden, wobei neben der Höhe der Wolken auch die optischen Eigenschaften eine entscheidende Rolle spielen. Die Klassifikation selbst basiert auf der Maximum-Likelihood Methode, die dazu benötigte Statistik wird automatisch in Abhängigkeit von geographischer Breite oder Untergrund erstellt und ist auch für andere statistische Verfahren als Eingabedatensatz geeignet. Zusätzlich zur Wolkenklassifikation beinhaltet dieses Modul noch ein Verfahren zur Erkennung von Sonnenreflex- und Schneeflächen, da diese Flächen teilweise sehr leicht mit Wolken verwechselt werden können.
3. Das dritte Modul wurde entwickelt, um Wolkeneigenschaften abzuleiten. Dabei kann in geometrische, radiometrische und mikrophysikalische Eigenschaften unterteilt werden. Als geometrische Eigenschaften können die Wolkenobergrenze und die horizontale Ausdehnung der Wolkenfelder bestimmt werden. Zur Bestimmung der Wolkenuntergrenzen wurden Zeitreihen von synoptischen Bodenbeobachtungen analysiert, die für weitere Analysen im Schema bereitgestellt werden (Bolle et al, 1997). Darüber hinaus können die radiometrischen Eigenschaften, wie z.B. Reflexionsgrad, Emissionsgrad oder optische Tiefe der Wolken abgeleitet werden (Berger und Bolle, 1989, Berger et al, 1989, 1995, 1996). Die Bestimmung des effektiven Tropfenradius oder des effektiven Eiskristalldurchmessers rundet dieses Programm ab (Halecker, 1998, Halecker und Berger, 1999).
4. Im vierten Modul werden die Landoberflächeneigenschaften in einer wolkenfreien Atmosphäre abgeleitet. Dazu wurden geeignete Strahlungstransfermodelle angewandt, um eine Atmosphärenkorrektur durchführen zu können. Ein weiterer Aspekt ist die

Berechnung der Gesamtalbedo (dem über das solare Spektrum integrierten Reflexionsvermögen) aus einzelnen Spektralband-Informationen. Dazu wurde nach ausführlichen Tests ein geeignetes Verfahren ausgewählt (Song und Gao, 1999). Ein weiterer Aspekt ist die Bestimmung der Erdoberflächentemperatur mit Hilfe von Split-Window Techniken (Qin, 1999). Eine einfache Landnutzungsklassifikation, basierend auf dem normalisierten Differenzen Index (NDVI), ergänzt dieses Modul.

5. Dieses Modul wurde entwickelt, um aus Satellitendaten mit den aus 2-4 abgeleiteten Informationen die Strahlungsbilanzkomponenten am Erdboden abzuleiten (Berger, 1995, Berger und Rockel, 1998a). Es basiert, wie die Bestimmung der optischen Tiefe von Wolken, auf einem inversen Fernerkundungsverfahren. Das heißt, daß rechenintensive Strahlungstransferrechnungen durchgeführt werden mußten, um das Satellitensignal zu simulieren, wobei der / die gesuchten Parameter variiert werden. Im Modul wird weiters ein empirisches Verfahren zur Bestimmung der atmosphärischen Gegenstrahlung nach Mecklenburg (1996) bzw. Mecklenburg et al (1999) berücksichtigt. Dieses Modul wird komplettiert mit Programmen zur Bestimmung der Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre und zur Bestimmung des Einflusses von Wolken auf den Strahlungshaushalt (Berger, 1991b, 1992ab, 1995ab).
6. Im letzten Modul können ergänzend die Energieflüsse am Erdboden, der Bodenwärmestrom, der sensible und der latente Wärmestrom abgeleitet werden (Berger, 2000).

Angewandt wurde dieses Verfahren auf eine Vielzahl von unterschiedlichen Untersuchungsgebieten und –zeiträumen. So konnte das Verfahren erfolgreich im Rahmen von BALTEX (Raschke, 1994) für mehrere Monate eingesetzt werden (Berger et al, 1997), für Fallstudien des *Mesoscale Alpine Programme (MAP)* (Berger und Jagdhuhn, 1998) oder LITFASS (Podlasly und Berger, 1999).

Neben den erwähnten Untersuchungen konnten im Rahmen zur Vorbereitung der ESA – Earth Radiation Mission (ESA, 1999) Untersuchungen durchgeführt werden, um die Möglichkeiten dieser zukünftigen Satellitenmission aufzuzeigen. Dabei handelt es sich insbesondere um die Synergie von aktiven und passiven Satellitenbeobachtungen, aus denen zwei zweidimensionale Informationen (Vertikalschnitt und horizontale Fläche) über die Strukturen in der Atmosphäre abgeleitet werden können (Illingworth, et al, 2000).

Bezüglich der Auswertung von Satellitendaten für die Ableitung von Wolkenparametern und von Strahlungsflüssen ist der Antragsteller als PI bei zwei ESA Projekten beteiligt. Dabei handelt es sich um ESA – AO 347 *Cloud Optical Properties inferred from combined satellite data analysis for the determination of surface and top of atmosphere fluxes* und um ESA – AO-ID 268 *Synergy of Envisat and Meteosat / MSG data to infer surface fluxes*.

1.6 Beschreibung des Arbeitsplans

Das Hauptziel dieses Teilprojektes ist die *Synergie von Bodenmessungen (zweidimensional / Vertikalschnitt durch die Atmosphäre) und Satellitenmessungen (zweidimensional / horizontale Draufsicht) zur Bestimmung eines dreidimensionalen Wolken- und Feuchtefeldes und der zeitlichen Entwicklung der Felder*. Dabei können die Arbeiten dieses Teilprojektes in die folgenden Arbeitsabschnitte unterteilt werden:

- (1) *Bestimmung der Gewichtsfunktionen* der verfügbaren Sensoren (Meteosat, NOAA-AVHRR, Meteosat Zweite Generation (MSG), ERS-1/2 ATSR und Envisat AATSR) und *Charakterisierung der möglichen* räumlichen, dreidimensionalen und zeitlichen *Auflösungen der einzelnen Satellitensysteme*
- (2) *Anpassung / Modifikation / Optimierung vorhandener Auswerteverfahren* auf die in diesem Teilprojekt genutzten Satellitendaten (Meteosat, NOAA-AVHRR, ERS-1/2 ATSR, Meteosat Zweite Generation / MSG und Envisat AATSR) zur Bestimmung der optischen (Reflexionsgrad, Emissionsvermögen und optische Tiefe der Wolken) und mikrophysikalischen (effektiver Tropfenradius bzw. effektiver Eiskristalldurchmesser) Wolkeneigenschaften mit Hilfe eines eindimensionalen Strahlungstransfermodelles (Streamer), sowie der geometrischen Wolkenstruktur, insbesondere der Wolkenobergrenzen, der horizontalen Wolkenfeldstruktur und der Erkennung von Mehrschichtbewölkung.
- (3) *Vergleich von Simulationsergebnissen des Strahlungstransfers*, berechnet mit Hilfe eines eindimensionalen (Streamer, Key, 1999) und eines dreidimensionalen Strahlungstransfermodelles (SHDOM, Evans, 1998) für wolkenlose und bewölkte Atmosphären, inkl. einschichtiger Wasser-, Misch- und Eiswolken, sowie verschiedener Mehrschichtwolken.
- (4) *Teilnahme am CLIWA-NET Feldmeßexperiment* mit eigenen Strahlungsfluß- und Energieflußmessungen, sowie detaillierter Beobachtung der Wolkenfeldstrukturen.
- (5) *Bereitstellung künstlich generierter Satellitenbilddaten*, basierend auf Modellsimulationen des Regionalmodelles REMO / HRM (GKSS), mit Hilfe der Simulation von Strahldichten am Oberrand für alle in dieser Untersuchung berücksichtigten Spektralbereiche. Dazu soll für unterschiedliche Wolkenzenarien das dreidimensionale Strahlungstransfermodell SHDOM angewandt werden.
- (6) *Entwicklung eines Auswerteverfahrens* zur Bestimmung der dreidimensionalen Wolkenstruktur mit den folgenden Einzelschritten, welches als Startbedingung die vertikalen Informationen (Vertikalprofile bzw. Vertikalschnitte) der Feuchte- und Wolkenfeldeigenschaften nutzt. Dabei sollen sowohl die geometrischen, als auch die optischen und mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften berücksichtigt werden. Für die Entwicklung des Verfahrens stehen darüber hinaus zwei Möglichkeiten zur Verfügung: einmal die Nutzung des künstlich erzeugten Datensatzes (Punkt 5) und einmal die Bodenmessungen des 4DWOLKEN Verbundes im Rahmen des Feldmeßexperimentes. Das Verfahren selbst ist wie folgt konzipiert:
 - (a) Annahme der Wolken- und Feuchtefeldstruktur der Nachbarbildelemente ausgehend von den vertikalen Informationen der Atmosphäre, insbesondere deren Feuchte- und Wolkenfeldeigenschaften
 - (1) ohne Veränderung bzw.
 - (2) mit Veränderung, gesteuert mit Hilfe eines statistischen Verfahrens unterstützt durch ein neuronales Netz
 - (b) Berechnung der Strahldichten am Oberrand der Atmosphäre für die einzelnen Satellitenkanäle und Vergleich mit den an den Satelliten gemessenen

Strahldichten eines einzelnen Bildelementes für jeden einzelnen Spektralbereich. Bei Übereinstimmung weiter bei (a1) für die nächsten Nachbarbildelemente, sonst bei (a2) weiter. Anwendung des physikalisch basierten, statistischen Verfahrens bis alle Bildelemente bearbeitet worden sind.

- (c) Vergleich der optischen Tiefe der Wolken in den einzelnen Bildelementen bestimmt aus den passiven Satellitendaten und mittels 3-dimensionaler Wolkenstruktur. Bei Übereinstimmung (innerhalb eines noch zu definierenden Toleranzbereiches) Berechnung der Strahlungsflüsse am Erdboden inkl. eines Vergleiches mit Bodenmessungen, sowie der Strahlungsflußdivergenzen in einzelnen Atmosphärenschichten. Da im Rahmen von 4DWOLKEN auch Flugzeugmessungen der Strahlungsflüsse und der Wolkenfeldeigenschaften (IfT Leipzig, FU Berlin) zur Verfügung stehen, sollen diese Datensätze für eine Validierung genutzt werden. Damit ist es möglich, die Unsicherheiten des Verfahrens zu quantifizieren.
- (7) *Anwendung des Verfahrens auf längere Datensätze*, insbesondere für die Feldmeßkampagne und Ableitung der zeitlichen Variabilität der einzelnen Strahlungsflüsse bzw. Strahlungsflußdivergenzen.
- (8) *Vergleich der Strahlungsflüsse (Oberrand und Unterrand der Atmosphäre) und der Strahlungsflußdivergenzen einzelner Schichten*, abgeleitet aus den Satellitendaten und modelliert mit dem Regionalmodell HRM / REMO (GKSS).

Literatur des Antragstellers und der Arbeitsgruppe

- Berger, F.H., 1989a: Cloud classes derived from AVHRR-data. In: 4th AVHRR data users' meeting, S. 65-68, EUMETSAT.
- Berger, F.H., 1989b: Cloud effect on climate. Third autumn workshop on atmospheric radiation and cloud physics, 27 November - 15 December 1989 - Trieste, Italy, International Center for Theoretical Physics.
- Berger, F.H., 1991a: Determination of optical properties of high clouds for radiation budget and climate studies. In: International Cirrus Experiment - Third Workshop in Villeneuve d'Ascq, 3-5 December, 1990 (Brogniez, G. und Parol, F., Hsgb.).
- Berger, F.H., 1991b: The influence of high clouds on the climate system using NOAA AVHRR data. In: 5th AVHRR data Users' meeting, S. 203-211, EUMETSAT.
- Berger, F.H., 1992a: Der Einfluß von hohen Wolken auf das Strahlungsfeld und auf das Klima durch Analyse von Satellitendaten. In: Deutsche Meteorologentagung 1992, S. 278.
- Berger, F.H., 1992b: Die Bestimmung des Einflusses von hohen Wolken auf das Strahlungsfeld und auf das Klima durch Analyse von NOAA-AVHRR Daten, Bd. Serie A Monographien von Band 6 / Heft 3. Meteorologische Abhandlungen des Instituts für Meteorologie der Freien Universität Berlin - Verlag Dietrich Reimer.
- Berger, F.H., 1992c: Die Bestimmung des Einflusses von Wolken auf das Klima durch Analyse von NOAA AVHRR-, METEOSAT und LANDSAT-Daten. In: Strahlung und Wolken (Raschke, E. und Rockel, B., Hsgb.), S. 81- 83, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Kurzberichte zur Begutachtung am 17./18. und 19. Februar 1992 in Leipzig.
- Berger, F.H., 1992d: The influence of high clouds on climate. In: European International Space Year Conference 1992, 30 March - 4 April 1992, Bd. I, S. 105-109, ESA.
- Berger, F.H., 1992e: The influence of clouds on Earth radiation budget using Meteosat and NOAA AVHRR data. In: 9th Meteosat Scientific Users' Meeting, Locarno, Switzerland, 15th - 18th September 1992, Bd. EUM P 11, S. 117-123, EUMETSAT.
- Berger, F.H., 1994: The influence of clouds on Earth radiation budget - A regional study: The North Sea. Adv. Space Res., 14 (1), 85-88.
- Berger, F.H., 1995a: Inference of the climatic efficiency of clouds from satellite measurements. Int. J. Remote Sensing, 16 (15), 2903-2926.

- Berger, F.H., 1995b: The Variability of Cloud Cover and Cloud Forcing for the North Sea inferred from NOAA-AVHRR Data. *Adv. Space Res.*, 16 (10), 29-32.
- Berger, F.H., 1998: Bestimmung von Erwärmungsraten im Falle konvektiver Wolken mit Hilfe von Satellitendaten. In: *Deutsche Meteorologentagung 1998*, S. 117-118.
- Berger, F.H., 2000: Bestimmung der Strahlungsbilanzkomponenten Am Erdboden mit Hilfe von Satellitendaten und deren Anwendung für regionale Energie- und Wasserkreislaufstudien. Habilitationsschrift, eingereicht in der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der Technischen Universität Dresden.
- Berger, F.H., H.-J. Bolle, F. Fell und U. Wohlfart, 1989: Validation of optical cloud parameters inferred from satellite measurements by ground observations. *Adv. Space Res.*, 9 (7), 152-159.
- Berger, F.H. und H.-J. Bolle, 1989: Use of satellite determined optical properties for estimates of cloud forcing. In: *IRS'88: Current problems in atmospheric radiation* (Lenoble, J. und Geleyn, J.-F., Hsgb.), S. 147-150.
- Berger, F.H. und S. Jagdhuhn, 1998: Radiation budget components at surface and at top of atmosphere for convective cloud cases in Central Europe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 23 (5/6), 611-617.
- Berger, F.H. und U. Hargens, 1993: The detection of clouds and their influence on radiation budget determined by multisensor satellite data. In: *Passive Infrared Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere* (Lynch, D.K., Hsgb.), Bd. 1934, S. 110-118.
- Berger, F.H. und Th. Halecker, in Vorbereitung: Ice/water cloud discrimination using IR window channels on board of future satellite systems. *Intern. J. of Remote Sensing - Letters*
- Berger, F.H., S. Jagdhuhn, B. Rockel und R. Stuhlmann, 1996a: Radiation Budget Components inferred from NOAA-AVHRR and Meteosat Data for the Baltic Sea. In: *IRS'96: Current problems in atmospheric radiation*.
- Berger, F.H., S. Jagdhuhn, B. Rockel und R. Stuhlmann, 1996b: Radiation Budget Components inferred from Meteorological Satellite Data. In: *The 1996 Meteorological Satellite Data User's Conference*, Vienna, Austria, 16th - 20th September 1996, S. 335-344, EUMETSAT.
- Berger, F.H., S. Jagdhuhn und S. Mecklenburg, 1997: High temporal and spatial variability of surface radiation budget components. In: *Hydrological, Oceanic and Atmospheric Experiences from BALTEX* (M. Alesto und H.-J. Isemer, Hsgb.), International BALTEX Secretariat, Publication No.8.
- Berger, F.H. und B. Rockel, 1998a: High temporal and spatial variability of surface radiation budget components. In: *9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, AVHRR Data User's Meeting*, 25-29 May 1998, Paris, France, S. 743-746, EUMETSAT - EUM P 22.
- Berger, F.H. und B. Rockel, 1998b: Vergleich von Strahlungsbilanzkomponenten am Erdboden, abgeleitet aus Satellitendaten und modelliert mit dem Regionalmodell REMO. In: *Deutsche Meteorologentagung 1998*, S. 255-256.
- Berger, F.H., R. Stuhlmann und S. Jagdhuhn, 1995: Radiation budget components inferred from satellite data for the Baltic Sea. In: *The Meteorological Satellite Data User's Conference*, Winchester, UK, 4th-8th September 1995, S. 417-425, EUMETSAT.
- Bolle, H.-J. und F.H. Berger, 1986: Spektrale Albedo und Reflexionseigenschaften von Pflanzen. In: *Zweites österreichisches Symposium Fernerkundung* (Mondre, E. und Pollanschütz, J., Hsgb.), S. 28-33, Forstliche Bundesversuchsanstalt in Wien.
- Bolle, H.-J. und F.H. Berger, 1995: Bestimmung des Einflusses von Wolken auf das Strahlungsfeld durch Analyse von NOAA AVHRR-, Meteosat- und Landsat-Daten. BMBF Abschlußbericht Wolken und Strahlung, FE Vertrag 07 KFT 38/3, Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin.
- Bolle, H.-J., F.H. Berger und S. Jagdhuhn, 1997: Bestimmung der Energiebilanzen am Erdboden für wolkenfreie und bewölkte Atmosphären mit Hilfe von Satellitendaten und deren Auswirkung auf das regionale Klima. BMBF Abschlußbericht Wasserkreislauf, FE Vertrag 07 VWK 01-6, Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin.
- Halecker, T.: Ableitung von Wolkeneigenschaften für die Niederschlagsbestimmung aus Satellitendaten (Meteosat Zweite Generation). Diplomarbeit, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden, Dezember 1998.
- Halecker, T. und F.H. Berger, 1999: Cloud properties inferred from MSG data. In: *The Meteorological Satellite Data User's Conference*, Copenhagen, DK, 6th-10th September 1999, 145-151.
- Halecker, Th., and Berger, F.H., in Vorbereitung: Microphysical cloud properties inferred from future satellite data for rain rate estimates. *Intern. J. of Remote Sensing*.
- Illingworth, A, van Lammeren, A. and F.H. Berger, 2000 / in prep.: Quantification of Synergy Aspects on the Earth Radiation Mission, ESA final report.
- Mecklenburg, S., F.H. Berger und C. Bernhofer, 1999: The influence of cloud optical thickness on terrestrial longwave radiation of a spruce forest for different cloud types. *Z. Meteor.*, 8, 22-27.
- Mecklenburg, S.: Änderung der langwelligen Ausstrahlung beim Auftreten von Wolken mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden, Dezember 1996
- Paape, K. und F.H. Berger, 1995: How accurate is a classification of thin clouds using NOAA-AVHRR Data? *Adv. Space Res.*, 16 (10), 25-29.

Paape, K.: Einfluß dünner Zirren auf die Bestimmung spektraler Bodenalbeden aus AVIRIS und NOAA/AVHRR. Diplomarbeit, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, Dezember 1994.

Podlasly, C.: Vergleich der für unterschiedliche Satellitensysteme modellierten, kurzwelligen Strahlungsbilanz am Erdboden für wolkenlose Atmosphären am Beispiel des Erzgebirges. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden, März 1998.

1.7 Erfolgsaussichten (aus wissenschaftlicher, technischer Sicht; wirtschaftliche oder andere Nutzungsmöglichkeiten, Zusammenarbeit)

Die Arbeitsgruppe *Strahlung und Energie im System Erde-Atmosphäre* des Antragstellers ist in den Lehrstuhl Meteorologie des Instituts für Hydrologie und Meteorologie der Technischen Universität Dresden integriert und kann daher sämtliche Ressourcen des Lehrstuhls nutzen. Dies sind insbesondere die mobilen Meßgeräte des Lehrstuhls Meteorologie zur Messung der Strahlungsbilanzkomponenten und der Energieflüsse am Erdboden, sowie die Nutzung der Meteosat Satellitendaten, die am Lehrstuhl mit Genehmigung des Deutschen Wetterdienstes und von EUMETSAT empfangen werden.

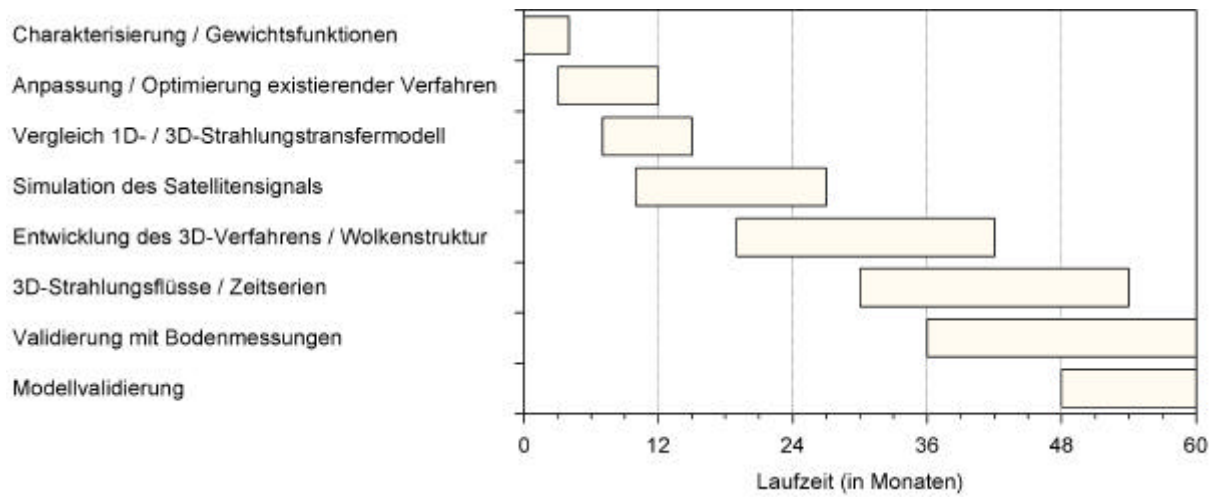
Die für dieses Teilprojekt relevanten Datensätze, ERS-1/2 ATSR, Envisat-AATSR und MSG, sind durch die ESA-Projekte (AO 347 *Cloud Optical Properties inferred from combined satellite data analysis for the determination of surface and top of atmosphere fluxes* und ID 268 *Synergy of Envisat and Meteosat / MSG data to infer surface fluxes*) gewährleistet.

Das Risiko des TU Dresden Beitrages ist gering, da die Methoden zur Bestimmung der optischen und mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften schon entwickelt und in vorangegangenen Projekten erfolgreich angewandt werden konnten. Das an der Freien Universität Berlin entwickelte und an der TU Dresden weiterentwickelte Verfahren zur Analyse von Satellitendaten zur Bestimmung der Strahlungsbilanzkomponenten am Ober- und Unterrand der Atmosphäre hat sich im Vergleich mit synoptischen Beobachtungen, Strahlungsmessungen, aber auch mit einem mesoskaligen Modell (Regionalmodell REMO) sehr bewährt. Es wurden bereits mehr als 4000 Bildszenen ausgewertet, so daß auch eine nahezu operationelle Bearbeitung der Satellitendaten möglich ist.

Darüber hinaus besteht im Rahmen von nationalen und internationalen Projekten eine vielfältige Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern auf unterschiedlichen Gebieten der Atmosphärenforschung. Das hier beantragte Teilprojekt stellt auch einen wesentlichen Beitrag für die Entwicklung zukünftiger Satellitensysteme, wie z.B. dem ESA Earth Explorer Earth Radiation Mission Satelliten oder für die Analyse zukünftiger amerikanischer Satelliten, wie CloudSat und Picasso, dar.

Das Studium der Wolken mit hoher zeitlicher Auflösung (MSG – 15 Minuten), insbesondere des Einflusses von Wolken auf den Strahlungs- und Energiehaushalt verbessert zugleich unsere Kenntnis von Wolken auf kurzen Zeitskalen. Es hat damit insbesondere für die Wettervorhersage eine entscheidende Bedeutung. Da die Wolken und damit der Einfluß der Wolken sehr eng mit dem Wasserkreislauf verknüpft ist, ergeben sich auch Möglichkeiten für die Klimamodellierung. Hier erscheint auch die adäquate Abbildung der Heterogenitäten auf größeren Skalen eine Möglichkeit der Verbesserung der numerischen Modellierung.

2. Balkenplan



Dr. Andreas Macke
Institut für Meereskunde an der
Universität zu Kiel (IfMK)
Düsternbrooker Weg 20
D-24105 Kiel
Tel.: 0431-597-3875
FAX: 0431-565876
email: amacke@ifm.uni-kiel.de

Vorhabensbeschreibung zum Thema:

4D Bewölkung der unteren Atmosphäre (4DWOLKEN): Parametrisierung der Strahlungsfelder inhomogener Bewölkung

1. Ziele

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das beantragte Vorhaben ist Bestandteil des Verbundprojektes 4DWOLKEN. Im Rahmen von 4DWOLKEN wird die Rolle der hohen raumzeitlichen (4D = 4-dimensionalen) Variabilität von Wolken in der Beschreibung von Austauschprozessen in der unteren Atmosphäre behandelt. Dabei wird eine umfassende Synergie von theoretischen und experimentellen Arbeiten angestrebt, ohne die ein echter Fortschritt in der Behandlung von Transportprozessen in Wolken nicht zu erwarten ist. Hauptziel des vorliegenden Teilprojektes ist es, den Zusammenhang zwischen reflektierten/emittierten Strahldichten inhomogener Bewölkung und den zugehörigen physikalischen Wolkeneigenschaften herzustellen um damit die großskalige satellitengetragene Erfassung der bewölkten Atmosphäre zu verbessern. Im Vordergrund steht die Erfassung des vertikal integrierten Wolkenwassers als bedeutendste Komponente des Energie- und Wasserhaushaltes. Hierzu werden Monte Carlo Strahlungstransportmodelle (MC-STP-Modelle) für den solaren und thermischen Spektralbereich entwickelt und auf gemessene und modellierte 4-dimensionale Wolkenfelder angewandt. Die im Verbundvorhaben von den Projektpartnern beantragten Wolkenmessungen sind an den Intensivphasen des EU-Projektes CLIWA-NET angegliedert und lassen einen einmaligen Datensatz der 4-dimensionalen Wolkenstruktur erwarten. Ergänzt werden diese Daten durch umfangreiche Wolkenrealisierungen mittels wolkenauflösender kleinskaliger atmosphärischer Modelle. Mittels statistischer Verfahren wird die Korrelation zwischen Strahlungsfeld und Wolkeneigenschaft (Flüssigwasserpfad, optische Dicke, Teilchengröße, Grad der Inhomogenität), sowie deren Güte ermittelt. Als konkrete Anwendung hiervon ist die Entwicklung und Validierung von Fernerkundungsalgorithmen fuer aktuelle Satellitenradiometer geplant.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen (Förderprogramm)

Die vorgeschlagenen Arbeiten fallen in den Bereich der „*Verbesserung des Systemverständnisses der Atmosphäre*“ und zwar in Bezug auf den „*Vertikaltransport in der Troposphäre: Wechselwirkungen mit Energie- Wasser- und Spurenstoffkreisläufen*“. Die direkten Bezugspunkte sind dabei:

- Wechselwirkung zwischen Vertikaltransporten in der planetaren Grenzschicht sowie dem Impuls-, Energie- Wasser- und Stoffhaushalt
- Transportprozesse zwischen planetarer Grenzschicht und der freien Troposphäre unter besonderer Berücksichtigung von Wolkenbildung und Strahlungshaushalt

Ein weiterer Bezug besteht hinsichtlich des AFO2000 Konzeptpapiers, in dem dem *Strahlungstransport in der bewölkten Atmosphäre aufgrund großer unverstandener*

Diskrepanzen zwischen experimentellen Ergebnissen und der modellmäßigen Beschreibung eine besondere Wichtigkeit bescheinigt wird (S. 1).

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Die im folgenden genannten Projektpartner und Arbeitspakete beziehen sich auf die Struktur des Verbundantrages, wobei hier nur diejenigen Arbeitspakete erwähnt sind, an denen der Antragsteller (Institut für Meereskunde an der Universität zu Kiel, im folgenden IfMK) direkt beteiligt ist.

a) Wissenschaftliche Ziele

- Entwicklung von MC-STP-Modellen für den thermischen Spektralbereich:
Zunächst soll ein am IfMK entwickeltes STP-Modell zur Berechnung von Strahldichten im Mikrowellenbereich (Helligkeitstemperaturen) zwecks Anwendung auf den thermischen Spektralbereich modifiziert werden. Da die hier verwendete Variante der Monte Carlo Methode (backward Methode) zur Berechnung der Strahlungsflussdichten wenig effizient ist, wird darüberhinaus ein komplementäres MC-STP-Modell (forward-Methode) entwickelt. (Projektpartner IPA, MIUB). (Arbeitspaket 3100)
- Realisierung 4-dimensionaler Wolkenfelder:
Das nichthydrostatische 3-dimensionale Atmosphärenmodell GESIMA soll mit realistischen Randbedingungen angetrieben kleinskalige (ca. 1km horizontale Auflösung) 4-dimensionale (drei Raumdimensionen und zeitliche Entwicklung) Wolkenstrukturen berechnen. Antriebsdaten ergeben sich aus einem globalen Datensatz von Radiosondenaufstiegen, sowie aus entsprechenden Daten des am GKSS Forschungszentrums betriebenen Regionalmodells. Die modellierten Wolkeneigenschaften werden unter Zuhilfenahme experimentell gewonnener Beziehungen zwischen Flüssigwassergehalt und Form der Tröpfchenspektren in strahlungstransportrelevante Größen (Extinktion, Einfachstreuabdo, Streufunktion) umgerechnet. Eine weitere Quelle 4-dimensionaler Wolkenstrukturen wird das vom Projektpartner TUD zu entwickelnde statistisch-dynamische Modell zur Generation von Wolkenfeldern aus Radiosonden- und Satellitenmessungen erbringen (Projektpartner: GKSS, IfT, TUD, MIUB). (Arbeitspaket 2200)
- Berechnung der Strahlungsfelder (solar und thermisch) für gemessene und modellierte inhomogene Wolken:
Die vorab entwickelten und validierten STP-Modelle sollen auf die berechneten Wolkenrealisierungen angewendet werden um die zugehörigen solaren und thermischen Strahlungsfelder zu erhalten. Dies liefert die Datenbasis für das Hauptziel dieses Teilprojektes (Projektpartner: GKSS, IfT, FUB). (Arbeitspaket 3300)
- Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Strahlungsfeldern:
Die flugzeuggetragenen Messungen der spektral hochaufgelösten Strahldichten sowie die Bodenmessungen der Photonenweglängenstatistik sollen unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Wolkeninformationen (Radar, Mikrowellenradiometer, Flugzeugmessungen, ...) simuliert werden um Schwächen in der STP-Modellierung bzw. in der experimentellen räumlichen Erfassung der Wolkenstrukturen zu erfassen. (Projektpartner: IfT, GKSS, IUP, FUB, IUP). (Arbeitspaket 3200)
- Korrelation der reflektierten solaren und emittierten thermischen Strahlungsfelder mit den relevanten physikalischen Eigenschaften 3-dimensionaler Bewölkung:

Dieser letzte und aufwendigste Arbeitspunkt dient der Entwicklung von Fernerkundungsverfahren. Hierbei sollen statistische Regressionen zwischen den (bi-)direktionalen Strahldichten und den zugehörigen Wolkengrößen wie optische Dicke,

Flüssigwasserpfad etc. hergestellt werden (Projektpartner IPA, TUD). (Arbeitspaket: 2100 und 3300)

b) Technische Ziele

- Optimierung und numerische Validation des existierenden MC-STP-Modelles für den solaren Spektralbereich:

Hier wird u.a. die Parallelisierung und Installation des STP-Modelles auf den Parallelrechnern des HLRZ Berlin angestrebt. Die numerische Validation des Modelles soll durch die Teilnahme am Modellvergleichsprojekt "*Intercomparison of 3D Radiation Codes*" (I3RC), sowie durch interne Vergleiche mit den MC-STP-Modellen des IPA gesichert werden (Projektpartner IPA). (Arbeitspaket 3100)

2. Stand der Wissenschaft und Technik; bisherige Arbeiten

2.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Berücksichtigung inhomogener Bewölkung in der Behandlung des Strahlungstransportes hat in den letzten Jahren einen hohen Stellenwert gewonnen, begünstigt durch die rasante Leistungssteigerung moderner Rechner und die damit verbundene Durchführbarkeit komplexer Strahlungstransportsimulationen. Die bislang durchgeführten Arbeiten zum Strahlungstransport in inhomogener Bewölkung waren im wesentlichen durch folgende Problemstellungen motiviert:

- Numerische Behandlung des 3-dimensionalen Strahlungstransportes.
- Abhängigkeit der Strahlungsbilanz vom Grad der Wolkeninhomogenität.
- Fehler in der STP-Modellierung durch die Vernachlässigung horizontaler Transporte (Independent Pixel Approximation IPA).
- Erhöhte Absorption in inhomogener Bewölkung im Vergleich zu homogenen planparallelen Wolken.
- Parametrisierung der Strahlungsfelder in Abhängigkeit der mittleren Wolkeneigenschaften.

Die numerische Handhabung der 3-dimensionalen STP-Modellierung kann mittlerweile als unkritisch betrachtet werden. Sowohl die Erweiterung klassischer Lösungsansätze (z.B. Evans, 1998) als auch die direkte Simulation der Photonenwege (z.B. Marchuk, 1980) liefern für gleiche Extinktionsfelder nahezu die gleichen Ergebnisse. Dies wurde in der ersten Phase eines internationalen Modellvergleichsprojektes, an dem der Antragssteller teilgenommen hat, demonstriert. Nähere Informationen hierzu finden sich im Internet unter <http://climate.gsfc.nasa.gov/I3RC/01.intro.html>.

Mit Hilfe dieser Modelle konnte gezeigt werden, dass die bisher verwendete Idealisierung planparalleler homogener Wolken im STP-Modell zu einer deutlichen Überschätzung der reflektierten solaren Strahldichten und damit auch der Wolkenalbedo führt (z.B. Cahalan et al., 1994; Di Girolamo et al., 1998)). Gleichwohl sind die bisherigen Ergebnisse zu diesem Thema eher qualitativer Natur. Aus Mangel an realistischen 3-dimensionalen Wolkenfeldern werden STP-Modelle zumeist auf künstlich erzeugte Wolkenstrukturen angewendet. Diese beruhen auf stochastischen Methoden wie z.B. der sogenannten 1- und 2-dimensionalen Kaskadenmodelle (z.B. Marshak, 1994), berücksichtigen aber weder die komplette räumliche Struktur der Wolke noch deren mikrophysikalischen Eigenschaften wie z.B. die Tröpfchengröße. Stochastische Wolkenrealisierungen lassen sich zwar so einstellen, dass ihre räumlichen 1- und 2-dimensionalen statistischen Eigenschaften denen tatsächlicher Wolken entsprechen, aber es ist zweifelhaft, ob sich die 3-dimensionale Struktur realer Wolken durch

diese Modelle zufriedenstellend wiedergeben lässt. So ist weder die zeitliche Entwicklung noch die thermodynamisch bedingte vertikale Struktur in stochastischen Modellen berücksichtigt.

Eine Alternative zur Konstruktion realistischer Wolkenfelder liefert die Analyse räumlich hochaufgelöster Satellitenmessungen (z.B. Barker und Davies, 1992; O'Hirok und Gautier 1998a und b). Allerdings ist hier die vertikale Struktur der Bewölkung ebenfalls nicht bekannt bzw. kann nur indirekt aus Radiosondenmessungen grob abgeschätzt werden. Außerdem liefert die Satellitenmessung aufgrund von horizontalen Strahlungstransporten zwischen benachbarten Wolkenelementen nur einen geglätteten und damit verfälschten Zustand der tatsächlichen Wolkenstruktur (Marshak et al. 1995).

Insgesamt bleibt festzuhalten, daß die Aussagekraft der bisherigen Arbeiten unter der Repräsentierbarkeit der verwendeten Wolkenstrukturen leidet. Es wird in diesem Vorhaben daher angestrebt, diesem Misstand durch die Anbindung der STP-Modellierung an Ergebnisse der dynamischen Wolkenmodellierung und der Wolkenmessung (in-situ, Satellit und Bodenfernerkundung) zu beheben.

Dynamische Wolkenmodelle liefern 4-dimensionale Wolkenstrukturen nahezu aller physikalischen Parameter wie Flüssigwasser, Eiswasser und Feuchte. Eine Kombination von Wolkenradar-, Mikrowellenradiometer-, Satelliten- und in situ-Messungen ist in der Lage, für einige Situationen tatsächliche räumliche Strukturen des Flüssigwassers zu bestimmen.

Zitierte Literatur:

- Barker, H. and J. A. Davies, 1992: Solar radiative fluxes for broken cloud fields above reflecting surfaces. *J. Atmos. Sci.*, 49, 749-761.
- Cahalan, R. F., W. Ridgway, W. Wiscombe, T. Bell and J. Snider, 1994: The Albedo of Fractal Stratocumulus Clouds *J. Atmos. Sci.*, 51, 2434-2455.
- Di Girolamo, L., T. Varnai and R. Davies, 1998: Apparent breakdown of reciprocity in reflected solar radiances *J. Geophys. Res.*, 103, 8795-8803.
- Evans, K. F., 1998: The spherical harmonic discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer. *J. Atmos. Sci.*, 55, 429-446.
- Marchuk, G. I., G. A. Mikhailov, R. D. Nazareliev, R. A. Darbinjan, B. A. Kargin, and B. S. Elepov, 1980: *The Monte Carlo Methods in Atmospheric Optics*, Springer-Verlag.
- Marshak, A., A. Davis A. , R. Cahalan, and W. Wiscombe, 1994: Bounded cascade models as nonstationary multifractals, *Phys. Rev. E*, 49, 55-69.
- Marshak, A., A. Davis, W. Wiscombe, R. Cahalan, 1995: Radiative smoothing in fractal clouds, *J. Geophys. Res.*, 100, 26247-26261.
- O'Hirok, W. and C. Gautier, 1998a: A three-dimensional radiative transfer model to investigate the solar radiation within cloudy atmospheres. Part I: Spatial effects, *J. Atmos. Sci.*, 55, 2162-2179.
- O'Hirok, W. and C. Gautier, 1998b: A three-dimensional radiative transfer model to investigate the solar radiation within cloudy atmospheres. Part II: Spectral effects, *J. Atmos. Sci.*, 55, 3065-3076.

2.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers

Der Antragsteller verfügt über langjährige Erfahrung in der Strahlungstransportmodellierung und Fernerkundung von Wolken. Die Schwerpunkte seiner Arbeit liegen auf der Behandlung nichtsphärischer Partikel und der Berücksichtigung inhomogener Wolkenstrukturen. Seine Arbeiten zur Lichtstreuung an atmosphärischen Eiskristallen wurden im Fernerkundungsschema des *International Satellite Cloud Climatology Project* (ISCCP) eingebaut, dienten als Grundlage für eine Strahlungsparametrisierung in Klimamodellen und waren Gegenstand zahlreicher Arbeiten zur Fernerkundung von Cirruswolken.

Die Behandlung der räumlichen Struktur von Wolken im Strahlungstransport wurde vom Antragsteller bereits 1995 begonnen. Hierbei wurden sogenannte "Zellulare Automaten"-Modelle zur Konstruktion 4-dimensionaler Wolkenfelder verwendet. Erst in jüngerer Zeit werden Ergebnisse von Wolkenmodellen für den Strahlungstransport benutzt. Bislang wurde

der Einfluss räumlich variabler Streueigenschaften und der horizontal inhomogenen Wasserdampfverteilungen auf die reflektierten, transmittierten und absorbierten Strahlungsflüsse untersucht. Der Antragsteller ist aktiv am internationalen Modellvergleichsprojekt I3RC (Mitglied des Planungsausschusses) und am EU-Vorhaben CLIWA-NET beteiligt. Im folgenden sind einige für das hier beantragte Vorhaben relevante Arbeiten aufgelistet.

- Bremen, v. L., E. Ruprecht, A. Macke: Errors in liquid water path retrieval arising from cloud inhomogeneity, Meteorol. Z. (submitted).
- Macke, A., R. Dlhopsky, J. Müller, R. Stuhlmann, R. and R. Raschke, 1995: A study on bidirectional reflection functions for broken cloud fields over ocean, Adv. Space Res., 16, 50-58
- Macke, A. J. Müller, K. Nagel, K. and R. Stuhlmann, 1997: A cellular automaton model for cloud formation: Radiative Properties, "IRS'96: Current Problems in Atmospheric Radiation, A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia", "234-237.
- Macke, A. and M. Grossklaus, 1998: Light Scattering by nonspherical raindrops: implications for lidar remote sensing of rainrates, J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans., 60, 355-363.
- Macke, A. D. Mitchell, D. and L. von Bremen, 1999: Monte Carlo radiative transfer calculations for inhomogeneous mixed phase clouds, Phys. Chem. Earth, 24, 237-241.
- A. Macke, 2000: Monte Carlo calculations of light scattering by large particles with multiple internal inclusions, in "*Light scattering by nonspherical particles*, Academic Press", 309-322.
- Scheirer, R. and A. Macke, 2000: Influence of the gaseous atmosphere on solar fluxes of inhomogeneous clouds, Phys. Chem. Earth, 25, 73-76.

3. Ausführliche Beschreibung des Arbeitsplans

3.1 Vorhabensbezogene Planung

Arbeitspaket 2100: **Experiment** (koordiniert durch IfT)

Der Antragsteller hat im Rahmen des EU-Vorhabens CLIWA-NET die Aufgabe, Flüssigwasserpfade aus Satellitenmessungen im solaren, thermischen und Mikrowellenbereich mittels klassischer Verfahren zu ermitteln und mit Bodenmessungen während der Messkampagnen zu vergleichen. Daher bietet es sich an, die im Rahmen dieses 4DWOLKEN-Teilprojektes zu erstellenden Fernerkundungsverfahren in die CLIWA-NET Aktivitäten einfließen zu lassen. Hierdurch wird es möglich, den Einfluss der Wolkeninhomogenität auf die fernerkundeten Flüssigwasserpfade abzuschätzen.

Arbeitspaket 2200: **4D-Wolkenanalyse** (koordiniert durch MIUB)

Parallel zur experimentellen Erfassung der Wolkenstrukturen werden mit Hilfe des nichhydrostatischen Atmosphärenmodells GESIMA eine Vielzahl von 4-dimensionalen Wolkenszenarien realisiert. Die Ergebnisse dienen hauptsächlich als Eingangsgrößen für MC-STP-Rechnungen, werden aber auch dahingehend analysiert, den Zusammenhang zwischen den

Antriebsdaten und der resultierenden Wolkeninhomogenität zu untersuchen. Antriebsdaten sind mittlere Temperatur-, Druck- und Feuchtefelder, wobei zusätzlich Feuchtestörungen in das Modellgebiet eingebaut werden, um lokale Konvektionsprozesse zu simulieren. Konvektion soll ausserdem durch heterogene Oberflächentemperaturverteilungen angeregt werden. Die Antriebsdaten entstammen einem globalen Datensatz von Radiosondenaufstiegen, sowie den REMO-Simulationen des Projektpartners GKSS.

Zur Umrechnung der Wolkenmodellergebnisse in strahlungstransportrelevante Größen (Extinktion, Einfachstreueralbedo, Streufunktion) ist im Prinzip die Kenntnis der Partikelgrößenverteilungen nötig. Da die zur Verfügung stehenden Wolkenmodelle Größenverteilungen nicht prognostizieren, muss nachträglich aus den zur Verfügung stehenden Daten die Teilchengröße diagnostiziert werden. Hierzu soll aus experimentell

gewonnenen Grössenverteilungen für verschiedene Wolkentypen der Zusammenhang zwischen Flüssigwassergehalt und mittlerem Tröpfchenradius ermittelt werden.

4-dimensionale Wolkenfelder werden auch im Rahmen dieses Vorhabens vom Projektpartner TUD bestimmt und sollen mit in den Wolkendatensatz einfließen. (Projektpartner: IfT, TUD)

Arbeitspaket 3100: **3D-STP-Modellentwicklung (exakt)** (koordiniert durch IfMK)

Innerhalb dieses Arbeitspaketes werden MC-STP-Modelle sowohl für den solaren als auch für den thermischen Spektralbereich entwickelt. Da die Bestimmung der solaren Strahlungsfelder rechenzeitintensiv ist, wird das am IfMK entwickelte solare STP-Modell GRIMALDI am Höchstleistungsrechenzentrum Berlin auf Parallelbetrieb eingestellt. Ein entsprechender Antrag zur Rechnernutzung ist bereits genehmigt. Die numerische Validation des Modelles soll durch die Teilnahme an den Phasen 2 und 3 des Modellvergleichsprojektes "Intercomparison of 3D Radiation Codes" Ende 2001 und Ende 2002, sowie durch interne Vergleiche mit den STP-Modellen des IPA gesichert werden.

Zur Behandlung des thermischen Spektralbereiches wird zunächst ein am IfMK für den Mikrowellenbereich entwickeltes MC-STP-Modell modifiziert. Hierzu sind Streu- und Absorptionseigenschaften der relevanten Gase (Wasserdampf, Sauerstoff, ...) und der Wassertröpfchen mit Hilfe des HITRAN Gasabsorptionsdatensatzes und Mie-Rechnungen auf den thermischen Spektralbereich anzupassen. Pro Modelllauf ergibt sich die Strahldichte bzw. Heligkeitstemperatur für eine diskrete Raumrichtung (backward-Methode). Da dies zur Bestimmung des kompletten Strahlungsfeldes u.U. sehr zeitaufwendig werden kann, wird in einem zweiten Schritt ein neues MC-STP-Modell auf Basis der forward-Methode entwickelt. Dieses Modell liefert pro Lauf das komplette Strahlungsfeld, allerdings nur für endlich grosse Raumwinkelintervalle. Ein weiterer Vorteil der forward-Methode liegt darin, daß die Strahlungsflussdichten (gesamte aufwärts oder abwärts gerichtete Strahlung) relativ schnell berechnet werden können. Die Kombination beider Modelle soll sowohl Genauigkeit als auch hinreichende Winkelabdeckung der modellierten Strahldichten gewährleisten. Entwicklung und Validation der Modelle findet in enger Kooperation mit IPA und MIUB statt. Dies beinhaltet auch die Behandlung der Gasabsorption in den jeweiligen Spektralbereichen.

3200: **STP-Modell-Validierung/Verbesserung** (koordiniert durch IUP)

Die flugzeuggetragenen Messungen der spektral hochaufgelösten Strahldichten (FUB, IfT) sowie die Bodenmessungen der Photonenweglängenstatistik (IUP) sollen unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Wolkeninformationen (Radar, Mikrowellenradiometer, Flugzeugmessungen, ...) mit Hilfe des solaren STP-Modelles simuliert und verglichen werden. Je nach Komplexität des Wolkentypes lässt sich aus den Abweichungen zwischen Messung und Simulation entweder auf die Genauigkeit der STP-Modelle oder auf die Güte der experimentellen Wolkenerfassung schließen. Die Photonenstatistiken der modellierten Wolken werden mit den IUP-Messungen verglichen, um Aussagen über die Fraktalität von Wolken herzustellen.

3300: **STP-Modellentwicklung (parametrisch)** (koordiniert durch IPA)

In diesem Arbeitspaket werden die entwickelten und numerisch als auch experimentell validierten STP-Modelle zunächst auf gemessene und simulierte Wolkenstrukturen angewandt. Die sich hieraus ergebenden solaren und thermischen Strahlungsfelder (jeweils in mehreren schmalbandigen Spektralbereichen) werden mit den zugehörigen Wolkeneigenschaften korreliert. Dies beinhaltet auch eine Hauptkomponentenanalyse der Wolkenfelder zur Bestimmung der für den Strahlungstransport wichtigsten Wolkenparameter. Hierbei wird auch untersucht, in welchem Masse gebietsgemittelte Wolkenparameter in der Lage sind, die tatsächlichen Strahlungsfelder wiederzugeben. Dieser Arbeitspunkt zielt auf zukünftige Parametrisierungen der Strahlungseigenschaften in nichwolkenauflösenden Atmosphärenmodellen und wird massgeblich vom Projektpartner IPA bearbeitet. Das Hauptziel

des vorliegenden Teilprojektes ist jedoch die Entwicklung von Fernerkundungsverfahren aus der Regression zwischen Strahlungsfeld und Wolkenparameter. Da diese beiden Datenmengen aufgrund der Natur des Strahlungstransportes hochgradig nichtlinear miteinander verknüpft sind, sollen

Neuronale-Netz-Techniken verwendet werden, um diesen Zusammenhang sowie dessen Güte herzustellen. Letzere wird abschliessend dazu genutzt, die Machbarkeit passiver Wolkenfernerkundung zu testen, da aufgrund der begrenzten Anzahl unabhängiger Messungen (wenige spektrale Kanäle, zumeist nur eine Raumrichtung) die mittleren Wolkeneigenschaften im Radiometerblickwinkel nur annähernd bestimmt werden können. Konkrete Anwendungen hierzu sollen für die Satellitenradiometer AVHRR und, falls aktuell, für die Radiometer auf den europäischen Satellitenplattformen ENVISAT (Environmental Satellite) und MSG (METEOSAT Second Generation) durchgeführt werden. Die Fernerkundungsalgorithmen sollen auf die während der Meßkampagne aufgenommenen Satellitenmessungen angewendet und die resultierenden Flüssigwasserpfade anhand der (genauen) Bodenmessungen validiert werden. Diese Arbeiten sind in enger Kooperation mit TUF geplant.

3.2 Koordination des Arbeitspaketes 3100

Der Antragsteller koordiniert das Arbeitspaket 3100 **STP-Modellentwicklung (exakt)**. Hierbei sollen zunächst die Arbeiten zur Entwicklung von MC-STP-Modellen der Projektpartner MIUB, IPA und IfMK für den thermischen und den Mikrowellenbereich aufeinander abgestimmt werden. Ein Vergleich der Modellergebnisse für feste Wolkenzenarien soll zur numerischen Validation dienen. IPA und IFMK entwickeln gemeinsam ein MC-STP-Modell auf Basis der forward-Methode. Hierbei werden Photonen von der Quelle (Erdoberfläche und Atmosphäre) zu den Detektoren (Satellitensensoren) hin verfolgt.

Weiterhin muss auf eine einheitliche Behandlung der gas- und wolkenpezifischen Materialkonstanten (spektrale Transmissionsfunktionen der atmosphärischen Gase, spektraler Brechungsindex von flüssigem Wasser), sowie der Streueigenschaften der Wassertröpfchen geachtet werden.

Der Antragsteller ist aktiv an einem internationalen Vergleichsprojekt 3-dimensionaler STP-Modelle beteiligt (I3RC). Hierdurch ergeben sich weitere Vergleichsmöglichkeiten mit externen Modellen. Da im Rahmen von I3RC auch verschiedene Techniken der STP-Modellierung diskutiert werden, eröffnet sich hier eine wichtige Quelle für Monte Carlo Techniken und deren numerischen Umsetzung. Es ist geplant, einige "Paradewolken" aus dem Verbundvorhaben 4DWOLKEN dem I3RC als Fallbeispiele zukommen zu lassen.

3.3 Meilensteinplanung

Der wesentliche Aspekt des gesamten Verbundvorhabens 4DWOLKEN ist die Integration der Ergebnisse der jeweiligen Teilprojekte. Da dies im Rahmen der Arbeitstreffen geschehen soll, bezieht sich die folgende Meilensteinplanung auf die angestrebten Verbundtreffen. Mit einem Projektbeginn am 1.10. 2000 ergibt sich folgender Zeitplan (in Projektmonaten):

1. **Treffen (Kick-Off: Monat 2):** Hier wird die Detailplanung des Projektes festgelegt. Dies beinhaltet sowohl die Zeitplanung, die Definition der Schnittstellen zwischen den einzelnen Arbeitspaketen als auch die Festlegung einer Datenaustauschpolitik insbesondere mit CLIWA-NET.
2. **Treffen (Experimentplanung: Monat 6):** Neben der Experimentplanung werden erste Ergebnisse der STP-Modellentwicklung, insbesondere für den thermischen Spektralbereich diskutiert.
3. **Treffen (Auswertung: Monat 19):** Zu diesem Zeitpunkt sollen erste Versionen der vermessenen Wolkenstrukturen und die gleichzeitig gemessenen Strahlungsgrößen

zwecks Vergleich an die STP-Modellierungsgruppen weitergegeben werden. Folgende Arbeiten des Teilprojektes sollen weitgehend abgeschlossen sein:

- Optimierung und numerische Validation der MC-STP-Modelle für den solaren Spektralbereich.
- Entwicklung von MC-STP-Modellen für den thermischen Spektralbereich
- Realisierung 4-dimensionaler Wolkenfelder mittels wolkenauflösender Atmosphärenmodelle
- Umrechnung der Wolkenparameter in strahlungstransportrelevante Grössen.

4. Treffen (Datenzusammenführung: Monat 26): Hier werden die ausgewerteten Messdaten, sowie erste Ergebnisse der STP-Rechnungen zusammengbracht. Insbesondere sollen STP-Simulationen der gemessenen Strahlungsfelder und der Photonenweglängenstatistik während der Messkampagne vorgestellt und diskutiert werden.

5. Treffen (Abschluss Phase 1: Monat 35): Die Arbeitspakete der Phase 1 werden vorgestellt, Basierend auf den Ergebnissen soll die Planung der 2. Projektphase stattfinden. Die restlichen Arbeiten des Teilprojektes sollen abgeschlossen sein:

- Simulation der gemessenen Strahlungsfelder und Interpretation der Ergebnisse
- Berechnung der solaren und thermischen Strahlungsfelder für eine hinreichend grosse Anzahl modellierter und gemessener Wolkenstrukturen
- Korrelation zwischen Strahlungsfeld und Wolkeneigenschaften. Vorstellung von Fernerkundungsverfahren. Validation der Fernerkundungsverfahren mittels Messdaten des Feldexperimentes.

Schliesslich werden die Endergebnisse den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Der folgende **Balkenplan** faßt die Meilensteinplanung für das beantragte Projekt zusammen:

Projekt-Monat	1 - 6	7 - 12	13 - 18	19-24	25-30	31-36
1.Treffen (Kickoff)	x					
Entwicklung 3D-STP-Modell (solar)	-----					
Entwicklung 3D-STP-Modell (thermisch)	-----	-----				
Wolkenmodellierung		-----	-----			
2. Treffen: (Experimentplanung)	x					
STP-Modell Anwendung (simulierte Wolken)			-----	-----		
STP-Modell Anwendung (gemessene Wolken)			-----	-----		
3. Treffen: (Auswertung)				x		
Vergleich gemessener/modellierter Strahlungsfelder				-----	-----	
Entwicklung und Anwendung von Fernerkundungsverfahren				-----	-----	
4. Treffen: (Datenzusammenführung)					x	
Zusammenfassung der Ergebnisse, Publikation						-----
5. Treffen (Abschluss Phase 1)						x

4. Verwertungsplan

4.1 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Aufgrund der international anerkannten Expertise in der Entwicklung verschiedenster Modelle zur Behandlung des Strahlungstransportes in der bewölkten Atmosphäre, sowie der Tatsache, dass die Basis für die in diesem Teilprojekt zu entwickelnden Modelle bereits existiert, kann davon ausgegangen werden, daß die Entwicklung, Anwendung und Auswertung sowohl der Atmosphären- als auch der STP-Modelle planmässig durchgeführt werden kann.

4.2 Wissenschaftliche Anschlußfähigkeit

Die Berücksichtigung inhomogener Wolkenstrukturen in Modell und Messung ist international ein hochaktuelles Thema. Aufgrund der zu erwartenden fruchtbaren Zusammenarbeit der einzelnen Teilprojekte ist mit einer grossen Anzahl von Veröffentlichungen in internationalen, begutachteten Zeitschriften zu rechnen. Darüberhinaus wird angestrebt, die Ergebnisse des Verbundes auf Internationalen Fachtagungen gebührend zu repräsentieren. Der Antragsteller ist seit mehreren Jahren an der Organisation der Jahrestagung der European Geophysical Society (EGS) beteiligt und wird sich dafür einsetzen, dem Forschungsthema im Rahmen der EGS ein entsprechendes Forum zu schaffen.

Durch Vergabe von Diplom- und Doktorarbeiten am IfMK ergibt sich die Möglichkeit, dass Thema zu vertiefen und für zukünftige Forschungsziele auszubauen.

4.3 Zusammenarbeit mit Dritten

Das beantragte Vorhaben ist Bestandteil des Verbundprojektes 4DWOLKEN. Die Zielsetzung dieses Verbundprojektes kann nur in koordinierter Zusammenarbeit der beteiligten deutschen

Forschungsgruppen erreicht werden. Der vorliegende Projektantrag trägt zu 4DWOLKEN die Analyse der Korrelation zwischen Wolkenparametern und zugehörigen solaren und thermischen Strahlungsfeldern bei und dient als Grundlage zur Entwicklung von Wolkenfernerkundungsverfahren und damit als Interpretationswerkzeug gemessener Strahlungsfelder.

Durch die Kombination von 4DWOLKEN und CLIWA-NET und I3RC werden weitere synergetische Effekte durch die gezielte Zusammenarbeit zwischen den drei Projekten möglich. Die Zusammenarbeit mit CLIWA-NET erbringt umfangreiche Validations- und damit Verbesserungsmöglichkeiten der Wolkenwasserfernerkundung. Die Zusammenarbeit mit I3RC eröffnet neue Perspektiven in der Methodenentwicklung von STP-Modellen für inhomogene Bewölkung. Mit Bernhard Mayer (DLR Oberpfaffenhoffen) wird bzgl. der STP-Modellentwicklung eine Kooperation angestrebt.

Darüberhinaus herrscht eine enge und langjährige Zusammenarbeit mit international renomierten Institutionen (Ecole Polytechnique, NASA-GISS, NCAR).