

Antragsteller

Prof. Dr. Jürgen Fischer
Institut für Weltraumwissenschaften
Freie Universität Berlin
Carl-Heinrich-Becker Weg 6-10
12165 Berlin

Telefon: 030/83856663
Fax: 030/8328648
e-mail: fischer@zedat.fu-berlin.de

Vorhabensbeschreibung zum Thema:

4D Bewölkung der unteren Atmosphäre(4D Wolken):

Experimentelle Untersuchungen und Modellierungen zum
Strahlungsbudget in der bewölkten Atmosphäre

1. Ziele

Das Gesamtziel des hier beschriebenen Vorhabens ist die systematische experimentelle Untersuchung des Einflusses der dreidimensionalen Struktur von Wolken auf das atmosphärische Strahlungsfeld. Es sollen spektral hochaufgelöste flugzeuggestützte Messungen von horizontalen und vertikalen Strahlungsflüssen im Bereich zwischen 400 und 1700 nm in verschiedenen Höhen (oberhalb, unterhalb und in der Wolke) durchgeführt werden. Darüber hinaus wird durch das abbildende Spektrometer *casi* (450-950 nm) die räumliche Struktur der Wolken erfasst sowie mittels des Fourierspektrometers MIDAC Messungen im infraroten Spektralbereich (4.5-15 μ m) durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden mit Messungen der Satelliteninstrumente MERIS, AATSR und MSG verglichen und dienen somit ebenfalls zur Validierung dieser neuen europäischen Sensoren. Im folgenden werden die wissenschaftlichen und technischen Zielsetzungen des Meßexperiments detailliert aufgeführt.

1.1. Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

A. Wissenschaftliche Zielsetzungen

- Die gemessenen und Strahldichten werden mit den Ergebnissen von eindimensionalen Strahlungstransportrechnungen verglichen. Auf diese Weise werden für unterschiedliche Bewölkungsgrade die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Strahldichten erfaßt und quantifiziert.
- Die so erfaßten Abweichungen zwischen simulierten und modellierten Strahldichten sollen als Grundlage für eine Parameterisierung dreidimensionaler Strahlungs-

transporteffekte dienen. Hierbei soll insbesondere die Skalenabhängigkeit dieser Effekte untersucht werden.

- Es werden Auswerteverfahren für den effektiven Tröpfchenradius und die optische Dicke von Wolken auf die Messungen angewandt. Diese Messungen können mit den während des Experiments von der GKSS (siehe unter Kooperationspartner) erhobenen in-situ Messungen sowie mit Verfahren, die im infraroten Spektralbereich arbeiten verglichen werden. Hierdurch besteht die Möglichkeit die bisher im nahen infraroten Spektralbereich gefundenen Diskrepanzen zwischen Messung und Simulation näher zu untersuchen und den Einfluß von dreidimensionalen Wolkenstrukturen auf die Ableitung von Wolkenparametern mittels Fernerkundung zu quantifizieren.

B. Technische Zielsetzungen

- Über die rein wissenschaftlichen Zielsetzungen hinaus bietet das vorgeschlagene Experiment und der hieraus gewonnene Datensatz die Möglichkeit umfassend zur Validierung von Wolkenparametern, die aus Satellitendaten abgeleitet wurden, beizutragen. Hierbei sind vor allem die neuen europäischen Satelliten ENVISAT und MSG zu nennen. Während der den Messkampagnen werden daher die Messflüge mit den jeweiligen ENVISAT-Überflügen koordiniert durchgeführt werden.

2. Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten

2.1. Stand der Forschung

Satellitenmessungen der reflektierten solaren Strahlung im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich werden vielfältig benutzt, um verschiedene Eigenschaften von Wolken, wie z. B. optische Dicke, Flüssigwassergehalt, Effektivradius, Albedo und Wolkenhöhe, abzuleiten (z. B. Twomey und Cocks, 1982, 1989; King, 1987; Nakajima und King, 1990; Nakajima et al., 1991; Rossow et al., 1989; Platnick und Twomey, 1994; Han et al., 1994; Nakajima und Nakajima, 1995; Platnick und Valero, 1995). Diese Techniken basieren alle auf der Tatsache, daß die Reflexionsfunktionen von Wolken in einem nichtabsorbierenden Kanal im sichtbaren Spektralbereich hauptsächlich eine Funktion der optischen Dicke ist, während die Reflexion im einem Flüssigwasser-Absorptionskanal im nahen infraroten im wesentlichen von der Tröpfchengröße abhängt. Für die Ableitung der Höheninformation vom Satelliten aus wird gegenwärtig hauptsächlich die IR-Helligkeitstemperaturmethode oder die CO₂-slicing Methode (Smith und Platt, 1979) verwendet. Als vielversprechender Ansatz haben sich auch Verfahren herausgestellt, die auf Messungen der Lichtabsorption durch Sauerstoff beruhen (Yamamoto und Wark, 1961; Wu, 1985; Fischer und Graßl, 1991).

Numerische Analysen haben gezeigt, daß das Reflexionsvermögen im solaren Spektralbereich nicht alleine von den lokalen Wolkeneigenschaften abhängt, sondern ebenso durch die Wechselwirkung mit benachbarten Wolkenelementen beeinflusst werden (Davies 1976; McKee und Klehr, 1978; Barker und Davies, 1992; Cahalan et al., 1994; Barker und Liu, 1995). Diese Arbeiten zeigten, daß eine Betrachtung der Beziehung zwischen räumlicher Verteilung der Wolkeneigenschaften und die Struktur des Strahlungsfeldes von großer Bedeutung ist.

Einige Studien befassen sich mit dieser Wechselbeziehung von Wolkenheterogenitäten (z. B. die Variation der optischen Dicke) und der räumlichen Verteilung reflektierten Strahldichte. In den meisten dieser Studien gehen davon aus, daß die Variation der optischen Dicke von der horizontalen Änderungen des Extinktionskoeffizienten herrühren, wobei eine flache

Wolkenoberkante angenommen wurde. Diese Untersuchungen zeigten, daß Strahlungsfelder „glatter“ erscheinen als die Felder der optischen Dicken, hauptsächlich, weil der Einfluß benachbarter Wolkenelemente aufeinander die Tendenz hat, die Unterschiede im Reflexionsvermögen auszugleichen (Stephens, 1988; Evans, 1993; Gabriel et al., 1997; Marshak et al., 1995a,b; Davies et al., 1997; Chambers et al., 1997).

Demgegenüber zeigen LIDAR Messungen (z. B. Boers et al., 1998), daß die Verteilung der optischen Dicke ebenfalls stark durch die Wolkenhöhe bestimmt wird. Studien von Varnai, 1996; Loeb et al., 1997, 1998; Loeb und Coackley, 1998 und Varnai und Davies, 1999) haben gezeigt, daß der Einfluß dieses Wolkenhöheneffektes deutlich unterschiedliche – und meistens stärkere – Auswirkung auf die mittlere Reflektivität einer Szene hat als die Variation des Extinktionskoeffizienten.

Neben Verfahren zur Ableitung von r_{eff} und LWP aus Messungen im solaren Spektralbereich existieren auch Verfahren zur Ableitung derselben Parameter aus Messungen von Spektrometern (vor allem HIS und AERI) (Smith et al. 1995) im thermischen Spektralbereich. Smith et al. (1993) waren die ersten, die einen Algorithmus zur Ableitung von LWP und r_{eff} vorstellten, der die Möglichkeiten der neuen Spektrometermessungen voll ausnutzte (hohe spektrale Auflösung, die die Trennung der Gasabsorption von der Wolkenemission möglich macht). In ihrer Methode wurden zuerst die Strahlungseigenschaften der Wolken (Emissions-, Transmissions- und Reflexionsgrad, unter der Annahme infinitesimal dünner Wolkenschichten) bestimmt, und dann aus diesen die mikrophysikalischen Parameter abgeleitet. Das Problem bei der Vorgehensweise von Smith et al. (1993) ist, dass die Berechnungen des Emissionsgrads für eine feste effektive Strahlungstemperatur T_c der Wolke vorgenommen wurden. Für Messungen vom Boden wurde diese gleich der Temperatur an der Wolkenunterkante gesetzt, und entsprechend für Messungen vom Flugzeug gleich der Temperatur an der Wolkenoberkante. Aus diesem Grund wurden dabei systematisch falsche (zu kleine) LWP-Werte abgeleitet.

Die zweite Studie, die auf Spektrometerdaten beruht, ist die von Lubin (1994). Hier wurden die mikrophysikalischen Parameter von tiefen Wolken über der Antarktis ebenfalls aus ihren Emissionsgraden abgeleitet, dafür wurde aber zusätzlich die Temperatur T_c bei der Spektrenanpassung mitberücksichtigt. Demgegenüber ließen Ackerman et al. (1990) in ihrem Algorithmus eine Variation von T_c in Abhängigkeit der optische Dicke zu und leiteten damit einen korrigierten Emissionsgrad ab. Allerdings schränkt bei dieser Variante die Vernachlässigung von Streuung den Bereich der Spektren ein, der für die Auswertung in Frage kommt. Collard et al. (1995) unterstrichen deshalb, dass die Bestimmung des Emissionsgrads vor allem nützlich für die Berechnung der Strahlungswirkung von Wolken im TIR ist, weniger jedoch für die Ableitung von LWP und r_{eff} . Im Hinblick auf diese Aufgabenstellung wird deshalb jetzt vermehrt dazu übergegangen, 1) einfache, direkt auf den Strahldichten basierende Auswertungsschemata zu verwenden (Collard et al. 1995) und 2) zugleich die Vertikalstruktur von Wolken detailliert mit einzubeziehen (DeSlover et al. 1999). Schließlich eignen sich Strahldichtebeobachtungen im thermischen Fenster prinzipiell auch für die Trennung zwischen Wasser- und Eisphase in Wolken. Das liegt an dem deutlich unterschiedlichen spektralen Verhalten der Brechungsindizes von Wasser und Eis und den daraus abgeleiteten optischen Eigenschaften von Wassertropfen bzw. Eiskristallen. Ackerman et al. (1990) und Strabala et al. (1994) konnten zeigen, dass mit Messungen bei $\lambda \approx 8 \mu\text{m}$, $\lambda \approx 11 \mu\text{m}$ und $\lambda \approx 12 \mu\text{m}$ es möglich ist, diese Unterscheidung vorzunehmen.

2.2. Eigene Vorarbeiten

Am Institut für Weltraumwissenschaften der Freien Universität Berlin bildet die Messung und Simulation des Strahlungstransfers in bewölkten Atmosphären sowie die Entwicklung neuer Fernerkundungsverfahren einen Schwerpunkt. In den vergangenen Jahren ist ein umfangreiches flugzeuggestütztes Meßsystem aufgebaut worden, das die reflektierte Strahlung im vom UV- Bereich bis ins thermische Infrarot mit hoher spektraler Auflösung zu erfassen erlaubt (Schüller und Fischer, 1995; Schüller et al. 1997). Das FUBISS (FU-Berlin integrated spectrometric system) besteht aus mehreren modular aufgebauten Spektrometern, die mit einer Auflösung von 2 nm bis 18 nm den Spektralbereich von 200 nm bis 1700 nm abdecken. Das abbildende Spektrometer mißt im Spektralbereich zwischen 500 nm und 900 nm in bis zu 19 programmierbaren Kanälen.

Fernerkundung von mikrophysikalischen Parametern: Die gleichzeitige Ableitung von optischer Dicke und Tröpfchenradius (Effektivradius) aus Strahldichtemessungen im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich (Schüller et al., 2000) basierte in der Vergangenheit auf der Annahme vertikal homogener Bewölkung. Im Gegensatz nimmt in realen Grenzschichtwolken der Flüssigwassergehalt mit der Höhe in der Wolke zu, somit auch die optische Dicke und ebenso der Tropfenradius. Da sich aber gleichzeitig der fernerkundete Effektivradius aus physikalischen Gründen nur auf die oberste Wolkenschicht beziehen kann, wird dieser nicht nur durch die mikrophysikalische Struktur der Wolke bestimmt, sondern ebenso durch die dynamische Variabilität: Die Variation der Wolkenhöhe beispielsweise bei gleicher Wolkenbasis führt zu einer Variabilität des beobachteten Effektivradius (am Wolkenoberrand), obwohl die Wolke die gleiche mikrophysikalische Struktur (etwa konstante Tropfenkonzentration) aufweist. Der fernerkundete Effektivradius ist deshalb nicht geeignet, etwa den Einfluß von Aerosolen auf die Wolkenmikrophysik und damit auf das reflektierte Strahlungsfeld zu beobachten.

Ein neuartiges Fernerkundungsverfahren, basierend auf einer realistischeren Simulation der vertikalen Struktur von Wolken wurde am Institut für Weltraumwissenschaften entwickelt, angewendet und validiert (Breguier et al., 2000a). Die plan-parallele, vertikal homogene Annahme wurde durch ein konzeptionelles Modell mit adiabatischen Vertikalprofilen der mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften ersetzt. Dieses Modell ist parameterisiert durch die geometrische Dicke der Wolken und der Anzahldichte der Wolkentröpfchen. Das neue Verfahren wurde auf Messungen während der ACE-2 / CLOUDYCOLUMN Kampagne 1997 (Breguier et al., 2000b) angewendet und die Ergebnisse mit in situ Messungen der Wolkenmikrophysik verglichen. Es besteht eine hohe Korrelation, allerdings bei einer systematischen Unterschätzung der Tropfenkonzentration.

Am Institut für Weltraumwissenschaften ist ein Fourier-Spektrometer (hier als "FT-IR-Spektroskop" bezeichnet) aufgebaut worden, mit dem Strahldichtemessungen an Wolken im Spektralbereich des thermischen Fensters möglich sind (Rathke 2000). Den Kern des realisierten Messaufbaus bildet ein von der Fa. Midac hergestelltes Fourier-Spektrometer, das sich zwar durch sehr kompakte Abmessungen und eine robuste Optik auszeichnet, dessen Elektronik allerdings nicht in der Lage war, den beweglichen Interferometerspiegel mit der erforderlichen Genauigkeit zu führen. Deshalb wurde am Institut für Weltraumwissenschaften eine neue Elektronik entwickelt, die nach den Vorschlägen von Brault (1996) ein völlig neu gestaltetes Abtastsystem bietet (Rathke et al. 2000). Damit können, wie bewiesen wurde, 1) Spektren mit der höchsten zur Verfügung stehenden spektralen Auflösung ($\Delta n \approx 1.0 \text{ cm}^{-1}$) in der für ein Interferometer kurzen Zeit von ca. 0.3 s gemessen werden (Vgl. mit anderen Interferometern, siehe Persky (1995)), und 2) die erhaltenen Interferogramme um verbleibende Gleichlaufschwankungen korrigiert werden. Damit ist das Fourier-Spektrometer optimiert für den mobilen Einsatz im Flugzeug. Mit dem FT-IR-Spektroskop gewonnene Spektren liefern sinnvolle Ergebnisse im Hinblick auf Strahldichten von tiefen

Wolken und geben ein informatives Bild der kleinskaligen Variabilität der Strahldichten (Rathke 2000).

Zur Auswertung der Messungen des FT-IR-Spektorradiometers steht ein neues Verfahren zur Verfügung, mit dem Parameter einer Wolkenschicht aus multispektralen Messungen im Spektralbereich des thermischen Fensters zuverlässig abgeleitet werden können (Rathke und Fischer 2000). Die Bestimmung des Effektivradius r_{eff} der Tropfen und des Flüssigwasserpfads LWP der Wolkenschicht geschieht durch schrittweise (iterative) Anpassung von Rechnergebnissen des Strahlungstransportmodells XTRA an gemessene Strahldichten. Darüber hinaus erlaubt es aus der multispektralen Information die dazugehörige, plausibelste Wolkenphase herzuleiten. Das Verfahren zeichnet sich durch seine Geschwindigkeit aus, die von der Rechengeschwindigkeit von XTRA und von der sehr geringen Anzahl von benötigten Iterationen herrührt. Diese Geschwindigkeit erlaubt es, die Fragestellung der Inversion physikalisch vollständig zu behandeln, und Effekte durch Streuung in Wolken, durch Reflexion am Erdboden und durch die besondere Vertikalstruktur von Wolken mit einem Minimum an Approximationen richtig zu Berücksichtigen.

2.3. Literatur

- Ackerman, S. A., W. L. Smith, J. D. Spinhirne, und H. E. Revercomb, 1990: The 27-28 October 1986 FIRE IFO cirrus case study: Spectral properties of cirrus clouds in the 8-12 μm window, *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 2377-2388.
- Collard, A. D., S. A. Ackerman, W. L. Smith, X. Ma, H. E. Revercomb, R. O. Knuteson, und S. C. Lee, 1995: Cirrus cloud properties derived from high spectral resolution infrared spectrometry during FIRE II. Part III: Ground-based HIS results, *J. Atmos. Sci.*, **52**, 4264-4275.
- DeSlover, D. H., W. L. Smith, P. K. Piironen, und E. W. Eloranta, 1999: A methodology for measuring cirrus cloud visible-to-infrared spectral optical depth ratios, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 251-262.
- Lubin, D., 1994: Infrared radiative properties of the maritime antarctic atmosphere, *J. Climate*, **7**, 121-140.
- Persky, M. J., 1995: A review of spaceborne infrared Fourier transform spectrometers for remote sensing, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 4763-4797.
- Rathke, C., und J. Fischer, 2000: Retrieval of cloud microphysical properties from thermal infrared observations by a fast iterative radiance fitting method, akzeptiert von *J. Atmos. Oceanic Technol.*
- Rathke, C., T. Ruhtz, A. Haack, und J. Fischer, 2000: Realization of improved electronics for a commercial FTIR spectrometer dedicated to airborne radiation measurements. *Proc. IRS2 2000 Conference*, Erfurt, Germany, AMA Service GmbH.
- Rathke, C., 2000: Fernerkundung der mikrophysikalischen Parameter von Wasserwolken aus Fourier-Spektrometernmessungen im thermischen Infrarot. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin, 160 pp.
- Smith, W. L., X. L. Ma, S. A. Ackerman, H. E. Revercomb, und R. O. Knuteson, 1993: Remote sensing cloud properties from high spectral resolution infrared observations, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1708-1720.
- Smith, W. L., H. E. Revercomb, R. O. Knuteson, F. A. Best, R. Dedecker, H. B. Howell, und H. M. Woolf, 1995: Cirrus cloud properties derived from high spectral resolution infrared spectrometry during FIRE II. Part I: The High-resolution Interferometer Sounder (HIS) Systems, *J. Atmos. Sci.*, **52**, 4238-4245.
- Strabala, K. I., S. A. Ackerman, und W. P. Menzel, 1994: Cloud properties inferred from 8-12- μm data, *J. Appl. Meteor.*, **33**, 212-229.
- Twomey, S. und T. Cocks, 1982: Spectral reflectance of clouds in the near infrared: Comparison of measurements and calculations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 583-592.
- Twomey, S. und T. Cocks, 1989: Remote sensing of cloud parameters from spectral reflectance in the near-infrared. *Beitr. Phys. Atmos.*, **62**, 172.
- Platnick, S. und S. Twomey, 1994: Determining the susceptibility of cloud albedo to changes in droplet concentration with the Advanced Very High Resolution Radiometer. *J. Appl. Meteor.*, **33**, 334-347.
- Platnick, S. und F. P. J. Valero, 1995: A validation study of a satellite cloud retrieval during ASTEX, *J. Atmos. Sci.*, **52**, 2985-3001.
- Rossow, W. B., L. C. Gardner und A. A. Lacis, 1989: Global seasonal cloud variations from satellite radiation measurements. Part I: Sensitivity analysis. *J. Climate*, **2**, 419-458.
- Nakajima, T. und 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. und T. Nakajima, 1995: Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions. *J. Atmos. Sci.*, 52, 4043-4059.
- Han, Q., W. B. Rossow und A. A. Lacis, 1994: Near-global survey of effective droplet radius in liquid water clouds using ISCCP data, *J. Climate*, 7, 465-497.
- King, M. D., 1987: Determination of the scaled optical thickness of clouds from reflected solar radiation measurements. *J. Atmos. Sci.*, 44, 1734-1751.
- Barker, H. W. und J. A. Davies, 1992: Cumulus cloud radiative properties and the characteristic of satellite radiance wavenumber spectra. *Remote Sens. Environ.*, 42, 51-64.
- Barker, H. W. und D. Liu, 1995: Inferring optical depth of broken clouds from Landsat data, *J. Climate*, 8, 2620-2630.
- Boers, R., J. D. Spinhirne und W. D. Hart, 1988: Lidar observations of the fine-scale variability of marine stratocumulus clouds. *J. Appl. Meteor.*, 27, 797-810.
- Cahalan, R. F., W. Ridgeway, W. Wiscombe, S. Gollmer und Harshvardhan, 1994: Independent pixel and Monte Carlo estimates of stratocumulus albedo. *J. Atmos. Sci.*, 51, 3776-3790.
- Chambers, L. H., B. A. Wielicki und K. F. Evans, 1997: Accuracy of the independent pixel approximation for satellite estimates of oceanic boundary layer cloud optical depth. *J. Geophys. Res.*, 102, 1779-1794.
- Davies, R., 1976: The three-dimensional radiative transfer of solar radiation in clouds. Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison, 220pp.
- Davis, A., A. Marshak, R. Cahalan und W. Wiscombe, 1997: The Landsat scale break in stratocumulus as a three-dimensional radiative transfer effect: Implications for cloud remote sensing. *J. Atmos. Sci.*, 54, 241-260.
- Evans, K. F., 1993: Two-dimensional radiative transfer in cloudy atmospheres: The spherical harmonic spatial grid method. *J. Atmos. Sci.*, 54, 3111-3124.
- Gabriel, P. M., S.-C. Tsay und G. L. Stephens, 1993: A Fourier-Riccati approach to radiative transfer. Part I: Foundations. *J. Atmos. Sci.*, 50, 3125-3147.
- Loeb, N. G. und J. A. Coackley Jr., 1998: Inference of marine stratus cloud optical depths from satellite measurements: Does 1D theory apply ?, *J. Climate*, 11, 215-233.
- Loeb, N. G., T. Varnai und R. Davies, 1997: Solar zenith angle dependence of solar radiation reflected from inhomogeneous clouds. *J. Geophys. Res.*, 102, 9387-9395.
- Loeb, N. G., T. Varnai und D. M. Winker, 1998: Influence of subpixel-scale cloud-top structure on reflectances from overcast stratiform cloud layers. *J. Atmos. Sci.*, 55, 2960-2973.
- Marshak, A., A. Davis, W. Wiscombe und R. Cahalan, 1995a: Radiative smoothing in fractal clouds. *J. Geophys. Res.*, 100(D) 26247-26261.
- Marshak, A., A. Davis, W. Wiscombe und G. Titov: 1995b: The versimilitude of the independent pixel approximation used in cloud remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, 52, 71-78.
- McKee, T. B. und J. T. Klehr, 1978: Effects of cloud shape on scattered solar radiation. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 399-404.
- Stephens, G. L., 1988: Radiative transfer through arbitrarily shaped optical media. Part I: A general method of solution. *J. Atmos. Sci.*, 45, 1818-1836.
- Varnai, T. und R. Davies, 1999: Effects of cloud heterogeneities on short-wave radiation: Comparison of cloud-top variability and internal heterogeneity. *J. Atmos. Sci.*, 56, 4206-4224.
- Smith W. L. and C. M. R. Platt, 1979: Intercomparison of radiosonde, ground-based laser, and satellite-deduced cloud heights. *J. Appl. Meteor.* 18, 1796--1802.
- Yamamoto, G. A. und D. Q. Wark, 1961: Discussion of the letter by R. A. Hanel: „Determination of cloud altitude from satellite“. *J. Geophys. Res.*, 66, 3596.
- Wu, M-L. C., 1985: Remote sensing of cloud top pressure using the reflected solar radiation in the oxygen A band. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 24, 11799-11810.
- Schüller, L. and J. Fischer, 1996: Multispectral flight measurements of the atmospheric water vapour bands, *Adv. Space Res.*, 17, 55-58.
- Schüller, L., J. Fischer, W. Armbruster und B. Bartsch, 1997: Calibration of high resolution remote sensing instruments in the visible and near infrared, *Adv. Space Res.*, 19, 1325-1334.
- Brenguier, J.-L., P. Y. Chuang, Y. Fouquart, D. W. Johnson, F. Parol, H. Pawlowska, J. Pelon, L. Schüller, F. Schröder und J. R. Snider, 2000b: An overview of the ACE-2 CLOUDYCOLUMN closure experiment, *Tellus B*, 52B, 814-826
- Brenguier, J.-L., H. Pawlowska, L. Schüller, R. Preusker, J. Fischer und Y. Fouquart, 2000: Radiative properties of boundary layer clouds: droplet effective radius versus droplet concentration, *J. Atmos. Sci.*, 57, 803-821.
- Schüller, L., W. Armbruster und J. Fischer, 2000: Retrieval of cloud optical and microphysical properties from multispectral radiances, *Atmos. Res.*, im Druck

3. Arbeitsprogramm

Messexperimente

Zentraler Bestandteil des hier vorgeschlagenen Projektes sind flugzeuggestützte Strahlungsflussmessungen, in vier Raumrichtungen (aufwärts, abwärts und seitlich). Diese Messungen werden in verschiedenen Höhen, unterhalb, oberhalb und in der Wolke durchgeführt werden. Zusätzlich zu den Strahlungsflussmessungen werden noch Messungen mit dem abbildenden Spektrometer casi durchgeführt, so dass die räumliche Struktur der Wolken erfasst werden kann. Im infraroten Spektralbereich erlaubt das Fourierspektrometer MIDAC spektral hochaufgelöste Messungen (1 cm^{-1}) in Nadirrichtung.

Es sind insgesamt zwei Messphasen mit insgesamt 10 Messtagen geplant. Die erste Messphase (August-September 2001) wird in Koordination mit dem in Cabauw (Niederlande) durchgeführten Experiment im Rahmen von CLIWA-NET (EU-Projekt) koordiniert, so dass neben den vom Flugzeug aus gemessenen Größen weitere unabhängige Messungen durchgeführt werden, die zur Validierung der hier abgeleiteten Größen verwandt werden.

Im Sommer 2002 soll eine zweite Messphase stattfinden, in der koordiniert mit der GKSS Überflüge über das Wolkenradar durchgeführt werden. In dieser Messphase soll mit geringem experimentellen Aufwand eine Verbreiterung der Datenbasis insbesondere in Hinblick auf die Validierung der aus ENVISAT-MERIS und MSG abgeleiteten Wolkenparameter erreicht werden.

Einfluß der räumlichen Heterogenität von Wolken auf abgeleitete wolkenmikrophysikalischer Parameter

Als nächster Schritt wird der Ableitungsfehler der durch horizontale Inhomogenitäten des Wolkenfeldes im Subpixelbereich der Satelliten entsteht, untersucht. Die Heterogenität der wolkenmikrophysikalischen Eigenschaften kann nicht einfach mit einem Zufallsgenerator simuliert werden, da diese nicht isotropisch sind. Vielmehr werden diese durch konvektive Prozesse bestimmt und die großskaligen Strukturen der Turbulenz in der Grenzschicht. Nur eine physikalisch basierte large scale eddy – Simulationsmodell (LES) liefert eine realistische Abbild der Wolkenstrukturen. Eine möglichst komplette Charakterisierung der internen Struktur der beobachteten Wolken mit Hilfe der in situ und passiven Fernerkundungsmessungen (hier vor allen Dingen die räumliche Wolkenstruktur, wie sie mit dem abbildenden Spektrometer casi erfaßt werden kann) wird als Eingabe für ein LES Modells benutzt, dessen Ergebnis ein komplettes Wolkenfeld in einer typischen Satellitenpixelgröße sein wird. Ein solches Wolkenfeld wird anschließend für die Simulation des dreidimensionalen Strahlungstransportes benutzt, mit der die Strahlungsgrößen wie Transmission, Reflexion und Absorption berechnet werden können, in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung der LES Simulationen.

Diese 3-D Simulationen bieten zudem die Möglichkeit, die Winkelabhängigkeit des Strahlungsfeldes bei dreidimensionalen Wolken zu berechnen. Diese Ergebnisse werden daraufhin mit den multidirektionalen Strahlungsflußmessungen verglichen, die vom Flugzeug aus ausgeführt werden.

Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur Ableitung mikrophysikalischer und optischer Wolkenparameter

Als Vorbereitung für die Validierung operationeller und experimenteller Satellitenprodukte werden mit Hilfe von flugzeuggestützter Fernerkundung sowie von in situ und Bodenmessungen mikrophysikalische Parameter mit verschiedenen Methoden abgeleitet und verglichen. Dieser Vergleich bietet eine Abschätzung der Ungenauigkeit durch die Verwendung unterschiedlicher Sensoren, Methoden und durch unterschiedliche spektrale und räumliche Auflösung.

Eine sorgfältige räumliche Kolokation und Synchronisation der einzelnen Messungen ermöglicht einen direkten Vergleich von fernerkundeten und in situ gemessenen Wolkeneigenschaften. Hierbei werden die operationellen Verfahren auf die vom Flugzeug aus gemessenen Strahldichten der Radiometer im sichtbaren und nahen Infraroten angewendet (casi und FUBISS). Parallel dazu kommen speziell entwickelte Algorithmen zum Einsatz, die die weiteren mit diesen Instrumenten möglichen Spektralkanäle einbeziehen. Auf diese Weise ist es möglich, limitierende Effekte zu identifizieren und quantifizieren, etwa die unterschiedliche Eindringtiefe der Photonen in die Wolkenschicht.

Gleichzeitig werden aus Emissionsmessungen im IR Bereich sowie aus bodengestützten RADAR-Messungen Wolkenparameter abgeleitet. Sämtliche mit aktiven und passiven Methoden fernerkundeten Wolkeneigenschaften werden anhand der in situ Messungen der Wolkenmikrophysik validiert.

Validierung von ENVISAT-MERIS und MSG Wolkenprodukten

Die neuen satellitengestützten Spektrometer MSG-SEVIRI und ENVISAT-MERIS (in Kombination mit AATSR) erlauben die Ableitung von Wolkenparametern, wie Albedo, optische Dicke und effektiver Tröpfchenradius. Für ENVISAT-MERIS werden diese Parameter von der ESA als routinemäßige Level 2 Produkte bereitgestellt. MSG-SEVIRI-Daten werden in verschiedenen von EUMETSAT geleiteten Satellite Application Facilities (SAF) sowie teilweise im zentralen MSG-Prozessor MPEF abgeleitet.

Einer Validierung dieser Parameter kommt insbesondere für die numerische Wettervorhersage aber auch für klimatologische Untersuchungen große Bedeutung zu.

In dieser zweiten Messphase werden auch Unterfliegungen des ENVISAT vorgenommen werden, so daß eine Validierung der aus ENVISAT-MERIS abgeleiteten Wolkenprodukte erfolgen kann. MSG wird voraussichtlich während beider Messphasen zur Verfügung stehen. Eine gemeinsame Validierung von MSG und ENVISAT-MERIS ist jedoch mehr erfolgversprechend, da ENVISAT-MERIS mit 550 m eine räumliche Auflösung bietet, die zwischen der der flugzeuggestützten Sensoren (wenige Meter) und MSG (mehrere Kilometer) liegt. Diese unterschiedlichen Skalen erlauben erstens eine Skalierung der höheraufgelösten Sensoren, auf die niedriger aufgelösten. Zum anderen sind sie Grundvoraussetzung für Untersuchungen zur Variabilität der abgeleiteten Produkte auf verschiedenen Skalen.

3.1. Zeitplan

Jan 2001- Jul 2001: Vorbereitung der Messkampagne. In der Vorbereitungsphase werden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Laborkalibration der neu angeschafften Spektrometer.

- Planung und Einbau der neu angeschafften Spektrometer in den bereits vorhandene Meßaufbau in der Cessna 207 T des Instituts für Weltraumwissenschaften.
- Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung von Strahlungsflüssen und Strahldichten aus allen Raumrichtungen und Einbeziehung der genauen Flugzeuglage und –position.
- Testmessungen und erste Testauswertungen

Aug - Sep 2001: Erste Meßkampagne. Die erste Meßkampagne wird in Zusammenarbeit mit dem von CLIWA-NET (EU-Projekt) in Cabauw (Niederlande) geplanten Experiment stattfinden. Dabei werden neben den hier vorgeschlagenen Messungen auch Wolkenradar (GKSS), Mikrowellenradiometer (Uni Bonn), in-situ Messungen der Wolkenmikrophysik (GKSS) unter anderem zur Verfügung stehen. Über die Strahlungsflußmessungen hinaus werden also für diesen Zeitraum ergänzenden Messungen zur Verifikation der gefundenen Ergebnisse vorhanden sein.

Okt 2001 - Mai 2002: Aufbereitung und erste Auswertung der Daten des Messexperiments Cabauw. Strahlungstransportsimulationen. Erste Vergleiche zwischen eindimensionalen Simulationen und Messungen.

Jun - Aug 2002: Zweite Messkampagne in Zusammenarbeit mit der GKSS. Zu ausgewählten Zeitpunkten (Überflüge ENVISAT) werden Messflüge über das GKSS-Wolkenradar durchgeführt.

Sep 2002- Sep 2003: Detaillierte Auswertung der Daten beider Experimente. Untersuchungen zur Skalenabhängigkeit der Ableitung mikrophysikalischer Größen aus Fernerkundungsdaten. Erstellung möglicher Parameterisierungen des Einflusses der 3D-Struktur von Wolken auf die Ableitung der mikrophysikalischen Parameter.

Okt 2003-Dez 2003: Vorbereitung von Publikationen, Abschlußbericht.

4. Wissenschaftliche Erfolgsaussichten

4.1. Wissenschaftliche Anschlußfähigkeit

Die langjährige Erfahrung des Antragstellers in der Planung, Durchführung und Auswertung von flugzeuggestützten Messexperimenten, wie sie in Kapitel 2.2 dargelegt ist, garantiert eine optimale Verwertung der Messungen und eine erfolgreiche Durchführung des Gesamtprojektes.

4.2. Zusammenarbeit mit Dritten

Das beschriebene Forschungsvorhaben bindet sich in das 4DWOLKEN Projekt unter Leitung von Prof. Simmer (Universität Bonn) ein. Eine intensive Zusammenarbeit mit den beteiligten Arbeitsgruppen wird durch regelmäßig stattfindende Koordinationstreffen erzielt. Die angestrebte Koordination zwischen 4DWOLKEN und dem EU-Projekt CLIWA-NET gewährleistet weiterhin sowohl eine internationale Verzahnung des vorgeschlagenen Vorhabens als auch die Erstellung eines möglichst umfassenden Datensatz zur Beschreibung der im Experiment untersuchten Wolken. Eine enge Zusammenarbeit besteht insbesondere mit der GKSS (Quante), die ebenfalls am zweiten geplanten Messexperiment teilnehmen wird.