

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 eindimensionale 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.

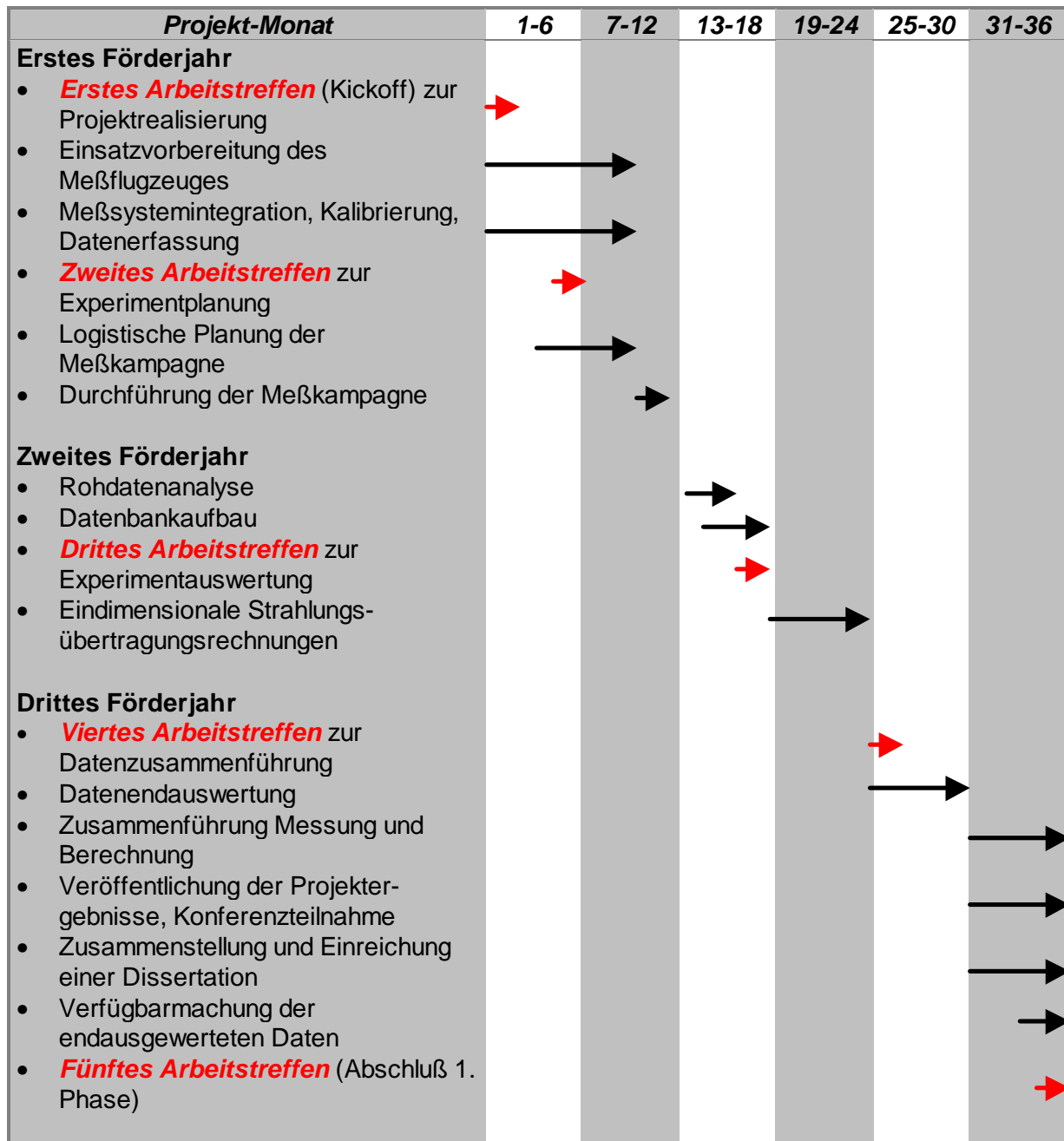
- Die Rohdaten werden mit entsprechenden Auswerteroutinen in physikalische Einheiten umgerechnet und auf Konsistenz und Verlässlichkeit geprüft.
- Es wird eine Datenbank errichtet, die für die an 4DWOLKEN beteiligten Gruppen verfügbar gemacht wird. In dieser gemeinsamen Datenbank werden entsprechend 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, Tohoku University Sendai, CCSR Tokio).

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

