

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
Pienerstraße 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 Programmmodul 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 Wolkenszenarien 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., Hsgeb.).
- 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., Hsgeb.), 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

