

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

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

## **Vorhabensbeschreibung zum Thema:**

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

#### **1. Ziele**

##### **1.1 Gesamtziel des Vorhabens**

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

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

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

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

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

## 1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

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

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

## 2. Motivation, Stand der Wissenschaft und Vorarbeiten

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

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

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

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

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

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

## 2.1 Vorarbeiten

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

Ein weiterer Punkt betrifft die Bestimmung der optischen Eigenschaften von Aerosolpartikeln unter Berücksichtigung des Feuchtwachstums und diejenigen von Wolkentropfen (Früh et al., 2000a; Früh et al., 2000b). Die optischen Rechnungen werden benötigt, um die Strahlungseigenschaften wellenlängenabhängig spezifizieren zu können. Ferner wurden von den Antragstellern unterschiedliche Strahlungstransportmodelle mit Hilfe von Messungen des aktinischen Flusses, von Strahlungsflussdichten sowie mit Photolyseraten  $\text{NO}_2$  und  $\text{O}^1\text{D}$ ) aus unterschiedlichen Kampagnen im Rahmen des TFS validiert.

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

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

## 3. Arbeitsprogramm

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

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

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

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

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

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

#### 3.1.1b Strahlungstransportsimulation im Langwelligen

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

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

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

### 3.1.2 Parametrisierungsansätze: - **Arbeitsphase 2** -

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

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

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

### **3.2 Arbeitspakete mit Beteiligung des IPA**

#### **Arbeitspaket 3100 (koordiniert durch IfM)**

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

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

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

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

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

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

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

### **Arbeitspaket 3200 (koordiniert durch IUP)**

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

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

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

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

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

### **Arbeitspaket 3300 (koordiniert durch IPA)**

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

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

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

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

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

### **Arbeitspaket 4100 (koordiniert durch IPA)**

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

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

### **Arbeitspaket 4200 (koordiniert durch TUD)**

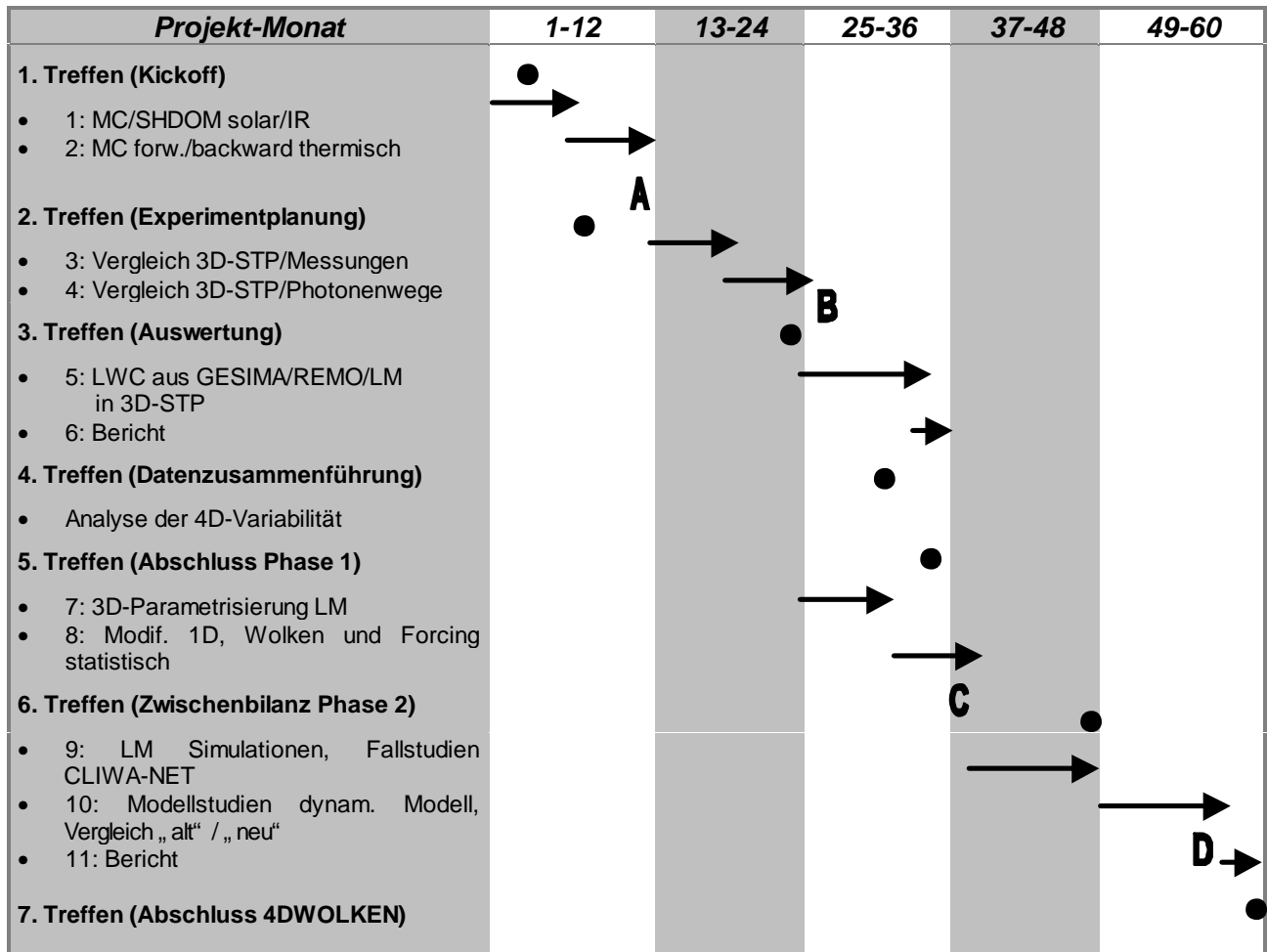
Dieses Paket widmet sich der Evaluierung/Validierung der mit den Modellen (3D-Strahlung "exakt" bzw. 3D-Strahlung "parametrisiert" in den dynamischen Modellen) ermittelten Strahlungseffekte mit Hilfe der bei CLIWA-NET ermittelten Messdaten sowie auf Basis der vom Satelliten aus bestimmaren Strahlungseigenschaften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

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

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

### 3.3 Balkenplan

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



Arbeitsetappen (Zeitraum in Monaten, M):

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



### **Meilensteine:**

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

## **4. Verwertungsplan, Erfolgsaussichten und Anschlussfähigkeit**

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

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

### 4.1 Bezug zum AFO2000-Verbund EFEU

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

### 4.2 Bezug zum AFO2000-Verbund MODMEP

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

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

### 4.3 Bezug zu geplantem Vorhaben CLOUDYA (DEKLIM)

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

## 5. Externe Kooperationspartner

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

## 6. Zitierte Literatur

- Cairns, B., A. A. Lacis, and B. E. Carlson, 2000: Absorption within inhomogeneous clouds and its parameterization in general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 700-714.
- Cess, R. D., and Coauthors, 1995: Absorption of solar radiation by clouds - Observations versus models. *Science*, **267**, 496-499.
- Cess, R. D., M. H. Zhang, Y. Zhou, X. Jing, and V. Dvortsov, 1996: Absorption of solar radiation by clouds: Interpretations of satellite, surface, and aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, **101**, 23299-23309.
- Evans, K. F., 1998: The spherical harmonic discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 429-446.
- Evans, K. F., and E. Puckrin, 1996: Near-infrared spectral measurements of liquid water absorption by clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1941-1944.
- Früh, B., T. Trautmann, M. Wendisch, and A. Keil, 2000a: Comparison of observed and simulated NO<sub>2</sub> photodissociation frequencies in a cloudless atmosphere and in continental boundary layer clouds. *J. Geophys. Res.*, **105**, 9843-9857.
- Früh, B., T. Trautmann, M. Wendisch, 2000b: Measurement-based J(NO<sub>2</sub>) sensitivity in a cloudless atmosphere under low aerosol loading and high solar zenith angle conditions. *Atmospheric Environment*, revised.
- Früh, B., 2000: Entwicklung und Evaluierung einer Modellhierarchie zur Simulation der aktinischen Strahlung in aerosolbelasteter und bewölkter Atmosphäre. Dissertation, zur Zeit angefertigt am Institut für Physik der Atmosphäre, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Fu, Q., and K.N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139-2156.
- Fu, Q., M. C. Cribb, H. W. Barker, S. K. Krueger, and A. Grossman, 2000: Cloud geometry effects on atmospheric solar absorption. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 1156-1168.

- Imre, D. G., E. H. Abramson, and P. H. Daum, 1996: Quantifying cloud-induced shortwave absorption: An examination of uncertainties and of recent arguments for large excess absorption. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 1991-2010.
- Li, Z., A. P. Trishchenko, H. W. Barker, G. L. Stephens, and P. Partain, 1999: Analyses of Atmospheric Radiation Measurement (ARM) program's Enhanced Shortwave Experiment (ARESE) multiple data sets for studying cloud absorption. *J. Geophys. Res.*, **104**, 19127-19134.
- O'Hirok, W., and C. Gautier, 1998a: A three-dimensional radiative transfer model to investigate the solar radiation within a cloudy atmosphere. Part I: Spatial effects. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 2162-2179.
- O'Hirok, W., and C. Gautier, 1998b: A three-dimensional radiative transfer model to investigate the solar radiation within a cloudy atmosphere. Part II: Spectral effects. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 3065-3076.
- Ramanathan, V., B. Subasilar, G. Zhang, W. Conant, R. D. Cess, J. T. Kiehl, H. Grassl, and L. Shi, 1995: Warm pool heat budget and shortwave cloud forcing: A missing physics? *Science*, **267**, 499-503.
- Stephens, G. L., 1996: How much solar radiation do clouds absorb? *Science*, **271**, 1131-1133.
- Trautmann, T., I. Podgorny, J. Landgraf, and P. J. Crutzen, 1999: Actinic fluxes and photodissociation coefficients in cloud fields embedded in realistic atmospheres. *J. Geophys. Res.*, **104**, 30173-30192.
- Valero, F. P. J., R. D. Cess, M. Zhang, S. K. Pope, A. Bucholtz, B. Bush, and J. Vitko, Jr., 1997: Absorption of solar radiation by the cloudy atmosphere: Interpretations of collocated aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, **102**, 29917-29927.
- Varnai, T., and R. Davies, 1999: Effects of cloud heterogeneities on shortwave radiation: Comparison of cloud-top variability and internal heterogeneity. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 4206-4224.
- Zender, C. S., B. Bush, S. K. Pope, A. Bucholtz, W. D. Collins, J. T. Kiehl, F. P. J. Valero, and J. Vitko, Jr., 1997: Atmospheric absorption during the Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Enhanced Shortwave Experiment (ARESE). *J. Geophys. Res.*, **102**, 29901-29915.