

**Die Bedeutung der Variabilität wolkenmikro- und  
makrophysikalischer Eigenschaften auf den solaren  
Strahlungstransport der bewölkten Atmosphäre**

**Kumulative Habilitationsschrift**

zur Erlangung der Venia legendi  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Christian-Albrecht-Universität  
zu Kiel

vorgelegt von  
Dr. Andreas Macke

Kiel  
2001

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einfachstreuung an Eiskristallen in Cirruswolken</b>	<b>4</b>
2.1	Streutheorie und Kristallmodelle . . . . .	4
2.2	Der Einfluss variabler mikrophysikalischer Wolkeneigenschaften . . . . .	7
2.3	Das Konzept inhomogener Eiskristalle . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Vielfachstreuung in inhomogener Bewölkung</b>	<b>11</b>
3.1	Wolkenstrukturen . . . . .	12
3.2	Strahlungstransportmodellierung . . . . .	14
3.3	Fehlerabschätzung klassischer Modelle . . . . .	17
3.4	Parametrisierung der solaren Strahlungsflussdichten in großskaligen Modellen . . .	19
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>21</b>

# 1 Einleitung

Wolken sind eindrucksvolle Manifestationen komplexer dynamisch-thermodynamischer Vorgänge in der Atmosphäre (siehe Abb. 1). Sie beeinflussen das uns umgebende Wetter- und Klimageschehen und werden selbst durch natürliche und anthropogene Klimaänderungen modifiziert.

Mit einem globalen Bedeckungsgrad von etwa 60 % bestimmen Wolken maßgeblich den Strahlungshaushalt unseres Planeten. Kondensationswärme treibt atmosphärische Zirkulationszellen mit an, die wiederum mit dem Ozean wechselwirken (z.B. ENSO). Kondensation und Verdunstung transportieren (negative) latente Wärme, und Frischwasserflüsse bestimmen die Landvegetation und Stabilität der ozeanischen Deckschicht.

Diese anerkannt hohe Bedeutung der bewölkten Atmosphäre für den Klimazustand unseres Planeten steht im eklatanten Widerspruch zu unserem heutigen quantitativen Verständnis der relevanten physikalischen Prozesse in Wolken. Gründe hierfür sind 1) die komplexen räumlichen Strukturen und mikrophysikalischen Eigenschaften der Wolken, 2) deren schnelle zeitliche Entwicklung und 3) deren schwierige experimentelle Zugänglichkeit.

So ist zwar bekannt, dass der wolkenbedingte Abkühlungsprozess aufgrund der in den Welt- raum zurückreflektierten Solarstrahlung dem Wolken-Treibhauseffekt überwiegt, Wolken also einen insgesamt abkühlenden Einfluss auf unser Klimasystem ausüben (Wielicki et al., 1995), allerdings liegen die globalen Mittelwerte dieses sogenannten Netto-Wolkenstrahlungsantriebes je nach Messmethode und Beobachtungszeitraum zwischen  $-18$  und  $-30 \text{ Wm}^{-2}$  (Ramanathan et al., 1989; Rossow, 1993). Lokal und abhängig vom Wolkentyp sind die Unsicherheiten erheblich größer.

Weiterhin wird seit vielen Jahren eine mögliche Diskrepanz zwischen theoretisch zu erwartender und experimentell erfasster solar breitbandiger Absorption in Wolken ("anomale Wolkenabsorption") von  $15 - 35 \text{ Wm}^{-2}$  diskutiert (Fritz und MacDonald, 1951; Cess und Co-Autoren, 1995; Ramanathan und Co-Autoren, 1995). Da Absorption nur indirekt über die Bilanzierung der gemessenen reflektierten und transmittierten Strahlung bestimmt werden kann und diese Messungen wiederum mit erheblichen Fehlern behaftet sind, ist die Hypothese der anomalen Wolkenabsorption umstritten (Stephens und Tsay, 1990). Aber auch die vereinfachte Behandlung des Wolkenstrahlungstransportes im Klimamodell kann als Erklärung nicht ausgeschlossen werden (Cairns et al., 2000).

Laut IPCC Report "Climate Change 2001" produziert die  $\text{CO}_2$ -Zunahme zwischen 1750 und heute mit etwa  $+1.4 \text{ Wm}^{-2}$  den größten Anteil an der Änderung des globalen Strahlungsantriebes. Vergleicht man diese Zahl mit der Unsicherheit des Wolkenstrahlungsantriebes von etwa  $20 \text{ Wm}^{-2}$ , so wird klar, dass eine sinnvolle Erforschung und Prognose unseres Klimasystems eine deutliche Verbesserung unseres Kenntnisstandes der Wolken-Strahlungs-Wechselwirkung erfordert.

Ziel der hier zusammengefassten Forschungsarbeiten ist die Berücksichtigung möglichst realistischer Wolkeneigenschaften in der Bestimmung der Strahlungsbilanz und in der Wolkenfernerkundung, als Grundlagenforschung, als Beitrag zur Klimamodellierung und als Voraussetzung für die Erfassung anthropogener Einflüsse auf die bewölkte Atmosphäre.

Im Klimamodell ist die Strahlungstransportmodellierung notwendig zur Bestimmung der Erwärmungs- und Abkühlungsprozesse des gesamten Klimasystems. Da die Lösung der Strahlungstransportgleichung lange Zeit nur für planparallele Atmosphärenschichtungen möglich war, wurden und werden Wolken in der Klimamodellierung und in der Fernerkundung durch stratiforme Geometrien idealisiert. Dies erscheint zunächst plausibel, da Wolken i.A. eine sehr viel größere horizontale als vertikale Ausdehnung besitzen. Die für den Strahlungstransport relevanten räumlichen Skalen, die mittleren Weglängen der Photonen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Extinktionsprozessen,



Abbildung 1: “Wolkenmeer”. Aus dem “Karlsruher Wolkenatlas” mit freundlicher Genehmigung von Bernhard Mühr.

reichen jedoch je nach optischer Dicke der Wolke bis in den Meter-Bereich. Nun ist der Zusammenhang zwischen den Strahl(ungsfluss)dichten und den Wolkeneigenschaften zumeist nichtlinear, so dass die Strahl(ungsfluss)dichten einer homogenisierten, d.h. gemittelten Wolke stets systematisch von den mittleren Werten einer realen räumlich strukturierten Wolke abweichen. Speziell für die prinzipielle Überschätzung der solaren Reflexion hat sich das angelsächsische Schlagwort *albedo bias* etabliert (Cahalan et al., 1994).

Wolken sind ein globales Phänomen und erschließen sich daher hauptsächlich mit den Methoden der Satellitenfernerkundung. Auch hier ist eine möglichst realistische Strahlungstransportmodellierung erforderlich, um richtige Zusammenhänge zwischen der am Satellitenradiometer gemessenen Strahldichte und den diese Strahldichte verursachenden Bewölkungszustand herzustellen.

Eine weitere und nachwievor weitverbreitete Idealisierung im Wolkenstrahlungstransport ist die Verwendung der Mie-Theorie, also die Annahme perfekt kugelförmiger Streukörper. Für reine Wasserwolken ist diese Idealisierung absolut vertretbar, allerdings weisen schon Regentropfen und erst recht Eispartikel in Mischphasen- und Eiswolken erhebliche Abweichungen von der Kugelform auf, deren Streu- und Absorptionseigenschaften mit der Mie-Theorie unzureichend erklärt werden. Da z.B. nichtsphärische Partikel im Vergleich zu oberflächen- oder volumengleichen Kugeln das Licht isotroper streuen, also bei gleicher optischen Dicke der Wolke mehr Solarstrahlung in den Weltraum zurückreflektieren, tritt auch hier ein *albedo bias* auf.

Damit konkretisieren sich die Ziele meiner Arbeiten auf die Berücksichtigung

1. nichtsphärischer Partikel in der Einfachstreuung, insbesondere in Cirruswolken, und
2. dreidimensionaler Wolkenstrukturen in der Vielfachstreuung,

also auf die beiden bedeutenden Geometrieeffekte der mikro- und makrophysikalischen Wolkeneigenschaften im Strahlungstransport der bewölkten Atmosphäre.

Meine kumulative Habilitationsschrift stellt einen Ausschnitt meiner wissenschaftlichen Aktivitäten der letzten sieben Jahre dar, der thematisch auf den folgenden fünf Publikationen beruht.

1. Macke, A. und Mishchenko, M. I., 1996. Applicability of regular particle shapes in light scattering calculations for atmospheric ice particles. *Appl. Opt.*, 35, 4291–4296.

Eine systematische Prüfung der Anwendbarkeit idealisierter Eiskristallformen in der Berechnung des Einfachstreu- und Absorptionsverhaltens realistischer Eiskristalle in Cirruswolken.

2. Macke, A., Francis, P. N., McFarquhar, G. M., und Kinne, S., 1998. The role of ice particle shapes and size distributions in the single scattering properties of cirrus clouds. *J. Atmos. Sci.*, 55(17), 2874–2883.

Eine statistische Abschätzung der Unsicherheiten in den verteilungsgemittelten Streu- und Absorptionseigenschaften atmosphärischer Eiskristalle aufgrund der Unkenntnis der aktuellen Größenverteilung.

3. Macke, A., Mishchenko, M. I., und Cairns, B., 1996a. The influence of inclusions on light scattering by large ice particles. *J. Geophys. Res.*, 101, 23,311–23,316.

Entwicklung und Anwendung eines neuartigen Modells zur Lichtstreuung an nichtsphärischen inhomogenen Partikeln aus der Verbindung der Methode der Geometrischen Optik und der Methode des Monte Carlo Strahlungstransportes.

4. Macke, A., Mitchell, D., und von Bremen, L., 1999. Monte Carlo radiative transfer calculations for inhomogeneous mixed phase clouds. *Phys. Chem. Earth (B)*, 24(3), 237–241.

Realisierung eines komplett dreidimensionalen Strahlungstransportmodelles in dem alle strahlungstransportrelevanten Größen (Extinktion, Streufunktion, Einfachstreueralbedo) räumlich variabel sind.

5. Scheirer, R. und Macke, A., 2001a. On the accuracy of the independent column approximation in calculating the downward fluxes in the UV-A, UV-B and PAR spectral ranges. *J. Geophys. Res.*, 106(D13), 14,301–14,312.

Bestimmung der Fehler der spektral integrierten Strahlungsflussdichten aufgrund herkömmlicher Idealisierungen der Wolkendarstellung in der Strahlungstransportrechnung.

Bis auf (Scheirer und Macke, 2001a) sind alle Veröffentlichungen vollständig in eigener Regie entstanden. Die genannten Co-Autoren haben durch hilfreiche Diskussionen (M.I. Mishchenko, B. Cairns) oder durch die Bereitstellung von Daten (P.N. Francis, G.M. McFarquhar, S. Kinne) und Wolkenmodellerngebnissen (D. Mitchell, L. von Bremen) beigetragen. Die Arbeit von Scheirer und Macke (2001a) stellt eine von mir wissenschaftlich betreute Weiterentwicklung der Arbeit (Macke et al., 1999) dar. In der folgenden Darstellung werden noch weitere Erst- und Co-Autorpublikationen meinerseits aufgeführt, die sich aus den fünf ausgewählten Arbeiten entwickelt haben.

## 2 Einfachstreuung an Eiskristallen in Cirruswolken

Der Beitrag der Cirrusbewölkung zum Strahlungshaushalt unseres Planeten sowie die Wechselwirkungsmechanismen dieses Wolkentyps hinsichtlich natürlicher und anthropogen verursachter Klimaschwankungen stellen große Unsicherheitsfaktoren in unserem Klimaverständnis dar (z.B. Liou, 1986). Insbesondere die große Variabilität von Eiskristallformen und Kristallgrößenverteilungen erschwert die theoretische Beschreibung der Streu- und Absorptionseigenschaften. Deren Kenntnis stellt aber eine notwendige Bedingung zur Interpretation von Fernerkundungsdaten und zur Bestimmung der Strahlungsbilanz dar. Cirruswolken wird aufgrund ihrer hohen solaren Transmissivität und ihrer geringen thermischen Abstrahlung generell eine Nettoerwärmung des Systems Erde/Atmosphäre zugesprochen. Allerdings hängt dies sensibel von der optischen Dicke und dem Teilchengrößenspektrum ab und kann auf Klimaänderungen verstärkend oder abschwächend einwirken (Zhang et al., 1999). Aber auch die direkte anthropogene Beeinflussung der Cirruswolken durch Abgasemissionen des zunehmenden Flugverkehrs kann die Nettostrahlungsbilanz der Cirruswolken modifizieren, einerseits durch vermehrte Eiswolken, andererseits durch Modifikation der mikrophysikalischen Eigenschaften (indirekter Aerosoleffekt).

Abbildung 2 zeigt, wie sich Form und Größe atmosphärischer Eiskristalle während des Wachstums- und Schmelzprozesses von wenigen Mikrometer kleinen “quasisphärischen” Partikeln über nahezu millimetergroße Dendriten hexagonaler Säulen (Flaschenprismenbündel) hin zu angeschmolzenen Eisklumpen verändern. Da sich die Größenverteilungen über drei Größenordnungen erstrecken, hängen die verteilungsgemittelten Streu- und Absorptionseigenschaften neben der Kristallgeometrie auch empfindlich von der Wahl der angewandten Größenverteilung ab.

### 2.1 Streutheorie und Kristallmodelle

Da atmosphärische Eiskristalle groß gegen die Wellenlängen der einfallenden solaren Strahlung sind, hat sich die Methode der Geometrischen Optik (GOM) zur Berechnung ihrer Extinktionseigenschaften durchgesetzt. Hierbei verfolgt man den Intensitäts- und Polarisationszustand hinreichend vieler einfallender Strahlen durch eine vorgegebene Kristallgeometrie und erhält aus der Menge aller herausgebrochenen Strahlen ein Bild des Streu- und Polarisationsverhaltens dieses Partikels. Im Gegensatz zur Mie-Theorie ist die GOM prinzipiell auf beliebige Streukörpergeometrien anwendbar, solange die kleinste Partikelausdehnung groß gegen die Wellenlänge der einfallenden Strahlung ist.

Der molekulare Aufbau von Eis lässt eine hexagonale Form der Eiskristalle erwarten. Obwohl in-situ Messungen zumeist komplexere Kristallgeometrien offenbaren, haben sich die ersten GOM-Modelle auf die Behandlung hexagonaler Säulen und Platten konzentriert (Takano und Liou, 1989, 1995). Erst eine Reihe von Unstimmigkeiten zwischen modellierten und beobachteten Strahlungsfeldern führte zu einem Umdenken. So wiesen Unterschiede in modellierten und beobachteten solaren Strahlungsflussdichten auf einen charakteristischen Asymmetrieparameter<sup>1</sup> von etwa 0.7 bis 0.75 hin (Stackhouse und Stephens, 1991; Kinne et al., 1992), wohingegen die hexagonal symmetrische Kristalle stets Werte größer 0.8 ergeben. Auch die beobachtete Winkelabhängigkeit der reflektierten und transmittierten Strahlung ist deutlich glatter als in den Modellergebnissen unter Verwendung hexagonaler Kristalle (Francis, 1995; Brogniez et al., 1995; Gayet et al., 1995).

Erst der von Macke et al. (1996b) eingeführte “fraktale Polykristall” lieferte Asymmetrieparameter und Strahldichtefelder, die deutlich besser mit Beobachtungen übereinstimmen (Francis,

<sup>1</sup>Mittlerer Kosinus des Streuwinkels, Maß für die Anisotropie der gestreuten Strahlung.

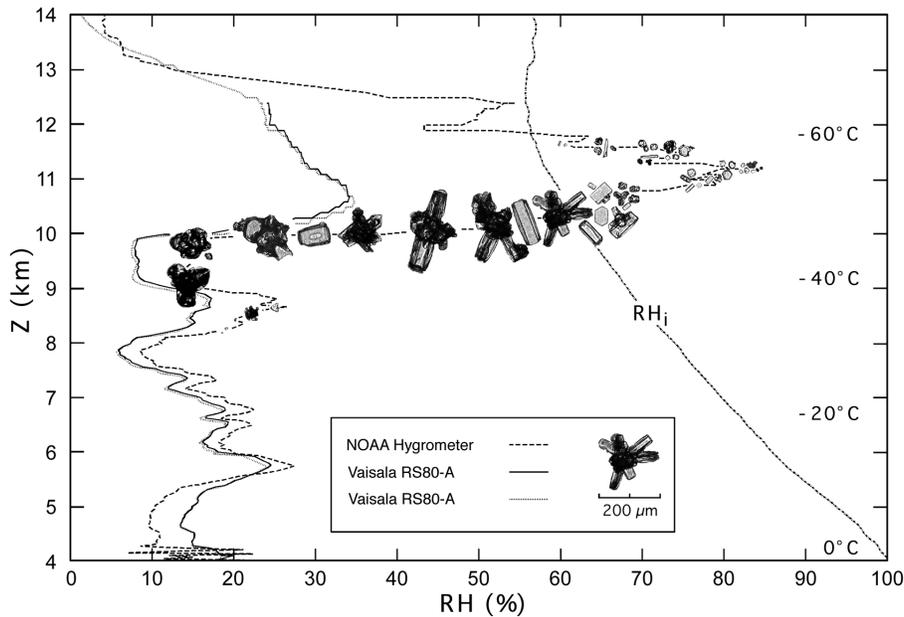


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Entwicklung von Eiskristallform und -größe. Replikatormessungen von Eiskristallformen sind entlang eines Vertikalprofils der relativen Feuchtigkeit bzgl. Wasser aufgetragen. Aus Miloshevich et al. (2001).

1995). Der fraktale Polykristall soll eine Streukörpergeometrie darstellen, dessen Eigenschaften darin bestehen, gleichzeitig kristallin und ansonsten vollkommen irregulär geformt zu sein. Damit entspricht diese Geometrie eher dem Mittel aus einem Ensemble unterschiedlichster Eiskristalle und nicht einer tatsächlich beobachtbaren Kristallform. Eine Reihe theoretischer und experimenteller Arbeiten, an denen ich beteiligt war, haben den fraktalen Polykristall in ihre Untersuchungen mit einbezogen (Francis, 1995; Mishchenko et al., 1996; Mitchell et al., 1996; Mitchell und Macke, 1997; Francis et al., 1998; Chepfer et al., 1999; McFarquhar et al., 1999; Zhang et al., 1999; Doutriaux-Boucher et al., 2000; Labonnote et al., 2000, 2001; Zhang et al., 2001; McFarquhar et al., 2001). Erwähnt seien hieraus zunächst Mishchenko et al. (1996), die die Basis zur Verwendung des fraktalen Polykristalls im Wolkenfernerkundungsverfahren des International Satellite Cloud Climatology Projects ISCCP gelegt haben und Mitchell et al. (1996), die eine Parametrisierung der solaren Strahlungsbilanz unter Verwendung dieses Kristalltyps zur Verwendung im Klimamodell entwickelt haben. Diese Parametrisierung ist in den Klimamodellen HadM3 (Hadley Center, UK) und UKMO (UK Meteorological Office) integriert (Kristjansson et al., 1999, 2000) und hat zu einer deutlich konsistenteren Berechnung der solaren Erwärmungsraten innerhalb der oberen Troposphäre geführt.

Da die GOM mit abnehmendem Größenparameter<sup>2</sup> ihre Gültigkeit verliert, ist deren Anwendung für kleinste [nahezu alle] Eispartikel im solaren [thermischen] Spektralbereich problematisch. Macke et al. (1995) haben erstmalig eine Abschätzung des Fehlers der GOM für nicht-sphärische Partikel durchgeführt. Durch den Vergleich der Ergebnisse der GOM und der exakten T-Matrix Methode (Mishchenko, 1993) für Lichtextinktion an Sphäroiden konnten wir feststellen, dass die Näherung der GO im Falle nicht-sphärischer Teilchen im Vergleich zu oberflächen- oder volumengleichen Kugeln deutlich kleinere Fehler verursacht. Die Nicht-sphärizität kommt der GOM also

<sup>2</sup>Verhältnis aus Partikelgröße und Wellenlänge.

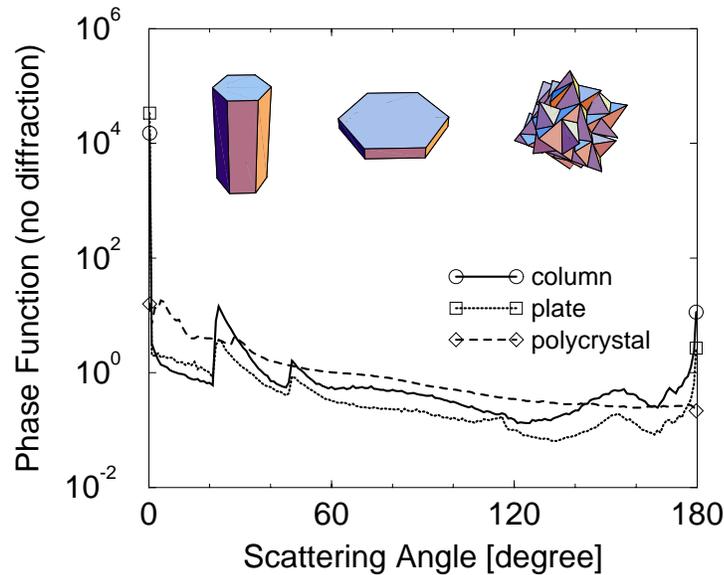


Abbildung 3: GOM-Berechnungen der Streufunktion (ohne Beugung) für dreidimensional zufällig orientierte Säulen, Platten und fraktale Polykristalle bei einer Wellenlänge von  $0.5 \mu\text{m}$ . Die maximale Ausdehnung ist bei allen drei Geometrien  $200 \mu\text{m}$ . Aus Macke et al. (1998).

entgegen! Für moderat absorbierende Partikel stimmte das Streuverhalten ab Größenparametern von 60 überein, die Einfachstreueralbedo<sup>3</sup> sogar ab Größenparameter 10. Später haben Wielaard et al. (1997) und Mishchenko und Macke (1999) gezeigt, dass eine zufriedenstellende Übereinstimmung für nichtabsorbierende Teilchen bei Größenparametern ab etwa 120 beginnt.

Aus numerischen Gründen ist die T-Matrix Methode für Größenparameter oberhalb 200 nicht anwendbar (Wielaard et al., 1997). Unsere Vergleichsstudien haben aber gezeigt, dass eine Kombination aus GOM und T-Matrix Methode eine lückenlose Abdeckung aller Partikelgrößen bzw. Wellenlängenbereiche gestattet.

Da die T-Matrix Methode auf symmetrische Partikelformen (Spheroide, Kreiszyylinder) beschränkt ist, gilt obige Aussage nur für ebendiese im Vergleich zu realen Eiskristallen stark idealisierten Geometrien. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit solche Vereinfachungen das Streu- und Absorptionsverhalten tatsächlicher Eiskristalle abbilden können. Hierzu haben wir die GOM-Ergebnisse der folgenden vier Kristallgeometrien miteinander verglichen (Macke und Mishchenko, 1996):

- hexagonale Zylinder und fraktale Polykristalle als die beiden Extreme realer Eiskristallformen sowie
- Ellispoide und Kreiszyylinder mit gleichem geometrischen Wirkungsquerschnitt und gleichem Achsenverhältnis als machbare Kristallformen im Rahmen der T-Matrix Methode.

Dabei stellt sich heraus, dass die Verwendung der idealisierten Formen im nichtabsorbierenden sichtbaren und auch im moderat absorbierenden nahen infraroten Spektralbereich zu unakzeptablem

<sup>3</sup>1 - Absorptionsvermögen.

bel hohen Unterschieden führt. Lediglich bei hoher Absorption im langwelligen solaren Spektrum zeigen hexagonale und kreisförmige Zylinder ähnliche Ergebnisse.

Insgesamt muss man aber aus diesem Vergleich den Schluss ziehen, dass die Verwendung idealisierter Kristallformen die Extinktionseigenschaften realer Eiskristalle nicht ausreichend berücksichtigt. Damit ist die Kombination aus GOM und T-Matrix Methode nicht in der Lage, das Extinktionsverhalten realistisch geformter Eiskristalle über dem gesamten Spektralbereich zu simulieren. Die sogenannten “Finite Difference Time Domain” FDTD-Modelle sind zwar in der Lage, exakte Lösungen für hexagonale Zylinder zu erhalten, allerdings nur bis Größenparameter 15 - 20 (Yang und Liou, 1995). Für diesen Kristalltyp ist eine Kombination aus GOM und FDTD also praktikabel. Es verbleibt allerdings eine Lücke zwischen Größenparameter 20 und 100. Für irreguläre Kristallformen existiert bis heute kein exaktes Verfahren.

## 2.2 Der Einfluss variabler mikrophysikalischer Wolkeneigenschaften

Zumindest im solaren Spektralbereich bleibt die GOM eine praktikables Verfahren zur Lösung des Streuproblems. Für die Anwendung in der Strahlungstransportmodellierung ist nun die Wahl einer Kristallgeometrie und einer Größenverteilung erforderlich. Um die Einschränkungen in den Ergebnissen der Streu- und Absorptionsberechnungen durch solch eine Festlegung abzuschätzen, haben Macke et al. (1998) verteilungsgemittelte Streufunktionen und Einfachstreueralbeden für eine Vielzahl von gemessenen Größenverteilungen berechnet. Hierbei sind alle zu der Zeit verfügbaren Verteilungen aus mehreren amerikanischen und europäischen Feldexperimenten zusammengefasst worden, um eine optimale Abdeckung der Variabilität reeller Kristallspektren zu erhalten.

Als Kristallgeometrien zur Berechnung der verteilungsgemittelten Größen wurden hexagonale Säulen, hexagonale Platten und fraktale Polykristalle verwendet. Abbildung 3 zeigt die Streufunktionen dieser prinzipiell unterschiedlichen Kristallformen im sichtbaren Spektralbereich. Man erkennt die ausgeprägte Vorwärtsstreuung aufgrund der Transmission durch planparallele Kristallfacetten, die hohe Rückstreuung aufgrund von Retroreflexion an senkrechten Kanten sowie die  $22^\circ$  und  $46^\circ$  Halos verursacht durch Brechung an  $60^\circ$  und  $90^\circ$  Kanten. Im Vergleich zu Säulen weisen Platten eine höhere Transmission und geringere Seit- und Rückstreuung auf. Der Polykristall nimmt durch das Fehlen “typischer” Strahlenwege eine deutlich glattere Streusignatur ein.

Die sich aus der Verwendung unterschiedlicher Größenspektren ergebenden Häufigkeitsverteilungen des Asymmetrieparameters  $g$  und der Einfachstreueralbedo  $\omega_0$  sind in Abb. 4 dargestellt. Für die Strahlungsbilanz von Cirruswolken ist hauptsächlich der Asymmetrieparameter im sichtbaren Spektralbereich (hier durch eine mittlere Wellenlänge von  $0.5 \mu\text{m}$  repräsentiert) verantwortlich, da hier das Maximum des einfallenden solaren Strahlungsflusses liegt und Eis im sichtbaren Spektralbereich vernachlässigbar gering absorbiert. Das wichtige Ergebnis dieser Arbeit ist nun, dass die Verteilungen von  $g(0.5\mu\text{m})$  für die unterschiedlichen Kristalltypen nicht überlappen. D.h., die Wahl des Kristalltyps hat einen sehr viel größeren Einfluss auf die solare Strahlungsbilanz als die der Größenverteilung.

Der physikalische Grund für den Einfluss einer bestimmten Größenverteilung auf das mittlere Streu- und Absorptionsverhalten liegt in den größenabhängigen Achsenverhältnissen der Säulen und Platten (Auer und Veal, 1970) sowie in der mit wachsender Kristallgröße zunehmend anisotroper werdenden Beugung. Der letztgenannte Effekt ist aber vernachlässigbar, wie man an der nahezu  $\delta$ -förmigen  $g(0, 5\mu\text{m})$ -Verteilung des irregulären Polykristalls sieht, dessen Form mit wachsender Größe konstant bleibt.

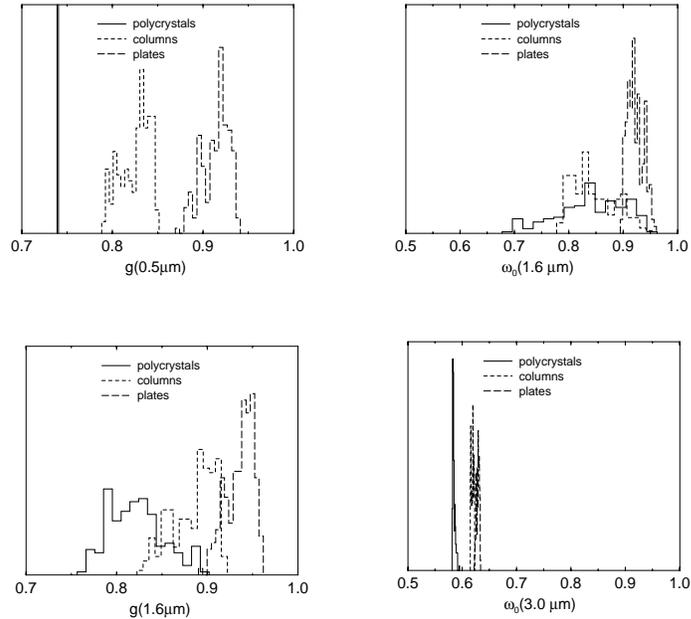


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung (beliebige Einheiten) des Asymmetrieparameters  $g$  bei  $0.5\mu\text{m}$  und  $1.6\mu\text{m}$  und der Einfachstreuabede  $\omega_0$  bei  $1.6\mu\text{m}$  und  $3.0\mu\text{m}$ . Aus Macke et al. (1998).

Bei einer Wellenlänge von  $1.6\mu\text{m}$  kommt durch die moderate Absorption an den Kristallen eine weitere Größenabhängigkeit hinzu, was zu einer deutlichen Verbreiterung der  $g(1.6\mu\text{m})$ -Verteilungen und zur Überlappung der Verteilungen für die unterschiedlichen Kristalltypen führt. Dennoch sind letztere noch unterscheidbar. Die Standardabweichungen der Verteilungen sind etwas geringer als der Abstand der Verteilungsmoden. Also hat auch im nahen Infrarot die Wahl des Kristalltyps einen gegenüber der Wahl der Größenverteilung dominanten Einfluss. Dies gilt auch für das Absorptionsvermögen, allerdings nur im Vergleich zwischen Säulen und Platten, wie die  $\omega_0(1.6\mu\text{m})$ -Verteilung zeigt. Der irreguläre Polykristall ist aufgrund seiner im Vergleich zu hexagonalen Zylindern kompakteren Form ein effizienterer Absorber, reagiert daher sensibler auf unterschiedliche Größenverteilungen und liefert die geringsten Einfachstreuabeden, was auch die Verteilungen im stark absorbierenden Bereich von  $3.0\mu\text{m}$  Wellenlänge bestätigen. Hier ist das Absorptionsvermögen nahezu gesättigt und die Abhängigkeit von der Größenverteilungen entsprechend gering.

Wie wirken sich die Schwankungen der Kristallformen und -Größenverteilungen nun auf den Strahlungstransport aus? Zur Beantwortung dieser Frage haben wir für 114 Größenverteilungen von Cirruswolken mittlerer Breiten jeweils für Säulen und fraktale Polykristalle die breitbandigen solaren Strahlungsflussdichten unter Verwendung der Monte Carlo Strahlungstransportmethode bestimmt. (Schlimme und Macke, 2001). Hierbei wurde angenommen, dass die Wolken homogen und planparallel sind, was eine akzeptable Näherung für die zumeist optisch dünnen Cirren darstellt. Die Ergebnisse der Monte Carlo Rechnungen sind in Abb. 5 gezeigt. Wie auch in der Einfachstreuung liegen die Werte aufgrund unterschiedlicher Kristallannahmen weiter auseinander als die Standardabweichungen der Flussdichten aufgrund der variablen Größenverteilungen. Immerhin können wir nun die Unsicherheiten aufgrund der variablen Kristallgrößenverteilung quantifizieren. Für irreguläre Eiskristalle ergibt sich eine Unsicherheit von etwa 4% in der Refle-

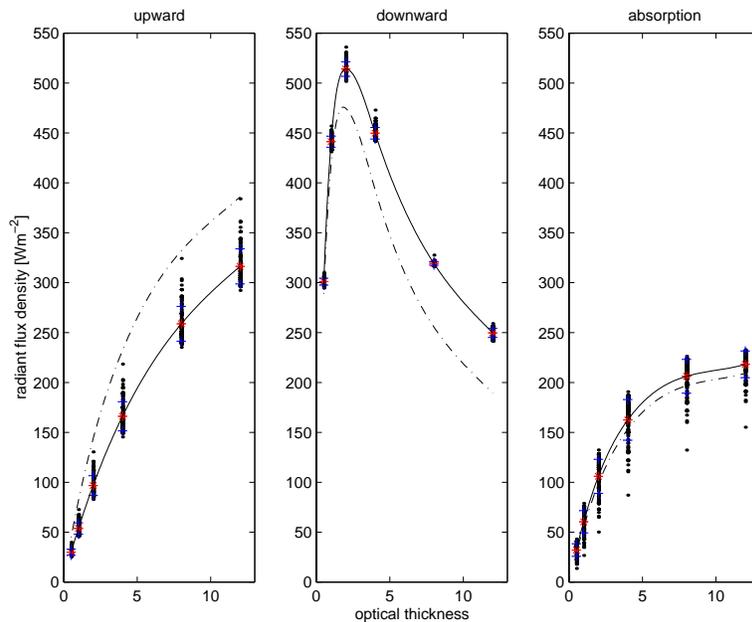


Abbildung 5: Solar breitbandige reflektierte, transmittierte und absorbierte Strahlungsflussdichten für 114 unterschiedliche Eiskristallgrößenverteilungen als Funktion der optischen Dicke. Durchgezogene (gestrichelte) Linie: mittlerer Kurvenverlauf für hexagonale Säulen (fraktale Polykristalle). Aus Übersichtsgründen ist für den Polykristall nur der mittlere Kurvenverlauf gezeigt. Aus Schlimme und Macke (2001).

xion, von etwa 2 - 3% in der Transmission und mit zunehmender optischen Dicke von 9 - 25% in der Absorption. Für hexagonale Säulen, die sensibler auf unterschiedliche Größenverteilungen reagieren, variiert die Reflexion um 7%, die Transmission um 1% und die Absorption mit zunehmender optischen Dicke um 20% bis 6%. Auch in Absolutzahlen ist die Unsicherheit in der Absorption mit etwa 15 - 20  $\text{Wm}^{-2}$ , je nach Kristalltyp, am größten.

Selbst wenn wir Gewissheit über die typische Form atmosphärischer Eiskristalle hätten —was wir nicht haben —, so resultiert schon aus der Unkenntnis der Kristallgrößenverteilung eine Unsicherheit in der solaren Strahlungsbilanz dieses Wolkentyps, die eine Größenordnung größer als der anthropogen verursachte Strahlungsantrieb ist.

### 2.3 Das Konzept inhomogener Eiskristalle

Eine weitgehend realistische Beschreibung des mittleren Streuverhaltens ergibt sich aus der Kombination hexagonaler und irregulärer (fraktaler Polykristall) Kristalltypen, wie wir in (McFarquhar et al., 1999) zeigen konnten. Allerdings liefert der Anteil des Polykristalls aufgrund dessen kompakter Form eine Überschätzung der Absorption. Eine andere Möglichkeit zur Kombination hexagonal symmetrischer und irregulärer Kristalleigenschaften, die dieses Problem umgeht, bietet das von mir entwickelte Monte Carlo GOM Konzept MC-GOM (Macke et al., 1996a; Macke, 2000). Hierbei geht man von einem bestimmten "Gaststreckkörper" aus, und erlaubt innerhalb dieses Streckkörpers Mehrfachstreuung an vordefinierten gleichverteilten Einschlüssen, wie in Abb. 6 schematisch dargestellt. Diese Mehrfachstreuung wird durch Monte Carlo Prozesse realisiert, d.h. abhängig von der optischen Dicke der Einschlüsse und deren Streu- und Absorptionsver-

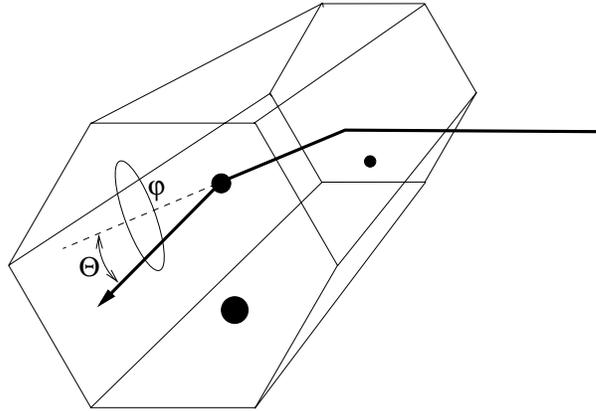


Abbildung 6: Illustration der Berücksichtigung interner Streuprozesse in einem hexagonalen Kristall mit streuenden und absorbierenden Einschlüssen. Ein einfallender Strahl wird in den Kristall hineingebrochen und intern an einem Einschluss um den Zenitstreuungswinkel  $\Theta$  und den Azimutstreuungswinkel  $\varphi$  abgelenkt. Aus Macke (2000).

halten werden freie Weglängen, Richtungsänderungen und Schwächung der vormals geradlinigen Lichtstrahlen im Kristall berechnet. Die Streu- und Absorptionseigenschaften der Einschlüsse werden vorab bestimmt. Die im folgenden gezeigten MC-GOM-Ergebnisse gelten für sphärische Einschlüsse, aber natürlich lassen sich auch nichtsphärische Einschlüsse berücksichtigen, wenn man nur mit geeigneten Methoden deren Extinktionseigenschaften bestimmt hat.

Beispiele für Einschlüsse in Eiskristallen sind Luftbläschen oder Aerosolpartikel. Auch Unstetigkeiten im Eis wie Brüche und Stufen wirken wie lokale Streukörper und können durch das Monte Carlo GOM Konzept berücksichtigt werden.

Abbildung 7 stellt die Änderung des Streuverhaltens hexagonaler Eissäulen mit wachsender optischer Dicke der Einschlüsse und für drei Typen von Einschlüssen, Ammoniumsulfat, Ruß und Luftblasen, dar. Quellen für Ammoniumsulfat und Ruß sind Abgase von Flugzeugtriebwerken und industrielle Emissionen. Luftblasen können durch schnelles Kristallwachstum oder spontanes Gefrieren von unterkühltem Wasser entstehen.

Die Vielfachstreuung innerhalb des Kristalls führt bei allen drei Einschlusstypen zu einer Reduzierung der Vor- und Rückstreuung sowie der Halos. Im Falle der nichtabsorbierenden Luftblasen und Ammoniumsulfatpartikel nimmt auch die Seitstreuung zu, so dass insgesamt eine deutlich isotropere Gesamtstreuung entsteht. Die stark absorbierenden Rußpartikel reduzieren den Anteil der GO Lichtstrahlen, so dass die stärker nach vorne streuende Beugung überwiegt und die Seitstreuung insgesamt abnimmt.

Das Konzept der MC-GOM ist auch von anderen Arbeitsgruppen übernommen worden und dient nun zur Konstruktion von Streufunktionen, die optimal vom Satelliten aus gemessene Strahldichtfelder reproduzieren (Labonnote et al., 2001). Hierbei wird das Achsenverhältnis und die Anzahl der internen Einschlüsse (Luftblasen und Ruß als Repräsentanten nichtabsorbierender und stark absorbierender Einschlüsse) variiert, bis die mit Hilfe der Streufunktion im Strahlungstransportmodell simulierten richtungsabhängigen Strahldichten den Satellitenmessungen optimal entsprechen. Im Gegensatz zur Verwendung des fraktalen Polykristalls, der ja stellvertretend für irregulär geformte Eisteilchen steht, hat die so ermittelte Streufunktion dann zwar keine mikrophysikalische Entsprechung mehr, ergibt aber für die Strahlungsbilanzberechnung und auch für

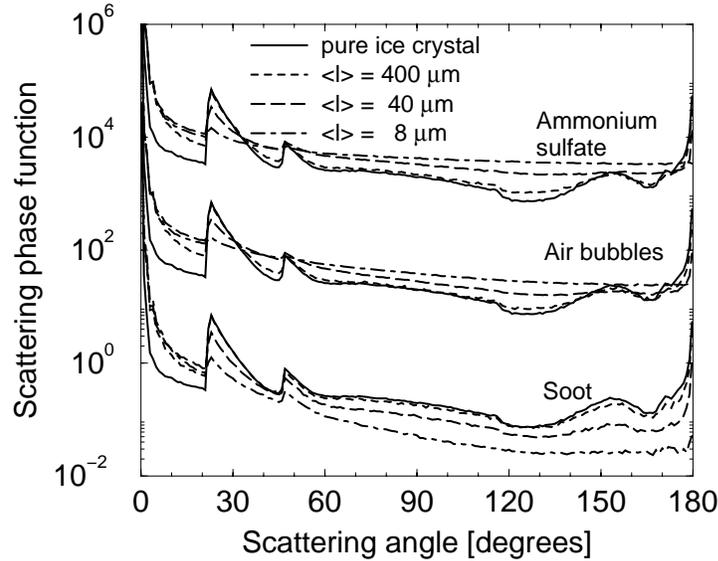


Abbildung 7: Streufunktion einer hexagonalen Eissäule mit kugelförmigen Einschlüssen aus Ammoniumsulfat (multipliziert mit  $10^4$ ), Luftblasen (multipliziert mit  $10^2$ ) und Ruß. Aus Macke et al. (1996a).

die Fernerkundung der optischen Dicke die optimale Eingangsgröße.

Die physikalisch plausiblere Bestimmung der Streu- und Absorptionseigenschaften aus der detaillierten Kenntnis der Kristallstrukturen wird noch einige Jahre an der begrenzten experimentellen Erfassung der Eiswolkenmikrophysik und an den Limitierungen der zur Verfügung stehenden Einfachstreutheorien scheitern.

### 3 Vielfachstreuung in inhomogener Bewölkung

Während die oben diskutierten Eiswolken i.A. optisch dünn sind und ihre solaren Strahlungseigenschaften stark vom Einfachstreuverhalten der Eiskristalle abhängt, ist die Situation für tiefe und mittelhohe Wolken nahezu umgekehrt. Die optischen Dicken sind erheblich größer und zumindest für reine Wasserwolken ist das Streuverhalten relativ konstant. Daher wird der Transport der solaren Einstrahlung durch die räumlich inhomogene Wolke zum dominierenden physikalischen Prozess.

Schon die Tatsache, dass uns Wolken mit bloßem Auge als räumlich komplexe Gebilde erscheinen, zeugt für die Relevanz des dreidimensionalen Strahlungstransports. Praktikable Lösungsverfahren der Strahlungstransportgleichung standen bis vor wenigen Jahren allerdings nur für rein vertikal geschichtete, also eindimensionale Atmosphären zur Verfügung. Einen nachwievor gültigen Überblick dieser Verfahren geben Hansen und Travis (1974).

Die Leistungsfähigkeit heutiger Computer ermöglicht die nahezu exakte Berechnung des dreidimensionalen Strahlungstransports mit der Monte Carlo Methode (MC-STM). Hierbei wird ein Photonenbündel von der Quelle (z.B. der Sonne) über alle Streu- sowie Absorptionsprozesse bis zu dem Punkt verfolgt, an dem das System verlassen oder vollständige Absorption erreicht

ist. Die freien Weglänge zwischen zwei Extinktionsprozessen, die Richtungsänderung während eines Streuprozesses und Absorption werden als Zufallsprozesse betrachtet, die gewissen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen gehorchen. Letztere ergeben sich aus den Extinktionskoeffizienten, Streufunktionen und Einfachstreuabeden (siehe Marchuk et al. (1980)).

Die von Evans (1998) entwickelte Methode der Kugelflächenfunktionen und Diskreten Ordinaten (engl. *Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method* SHDOM) berechnet den dreidimensionalen Strahlungstransport durch die numerische Lösung der Strahlungstransportgleichung. Zur Berechnung der Strahldichten und der internen Strahlungsfelder ist SHDOM der MC-STM überlegen. Zur Berechnung gebietsgemittelter Strahlungsflussdichten ist die MC-STM zunächst vorteilhafter, da sie für diese Problematik schneller ist. Der bedeutendere Vorteil der MC-STM besteht allerdings darin, dass beliebig un stetige Wolkenstrukturen und auch beliebig anisotrope Streufunktionen simuliert werden können, während SHDOM aufgrund der Entwicklung der Strahlungsgrößen nach Kugelflächenfunktionen bzw. aufgrund der Betrachtung endlich vieler "Diskreter Ordinaten" hier unpraktikabel werden kann.

### 3.1 Wolkenstrukturen

Bis heute ist aus experimenteller Sicht wenig über die komplette räumliche Struktur der Bewölkung bekannt. Flugzeug-, Bodenradar- und hochaufgelöste Satellitenmessungen ermöglichen immerhin ein- und zweidimensionale "Wolkenbeprobungen". Auf der Basis solcher Messungen, aber auch mittels theoretischer Betrachtungen ist die multifraktale Natur der räumlichen Wolkenflüssigwasser-Verteilung erkannt worden (Schertzer und Lovejoy, 1987; Lovejoy und Schertzer, 1990). D.h., Wolken weisen inhomogene Strukturen auf allen räumlichen Skalen auf.

Motiviert durch diese prinzipiell fraktale Struktur der Bewölkung und in Ermangelung experimentell erfasster dreidimensionaler Bewölkung sind MC-ST-Rechnungen zunächst nur für künstlich erzeugte Wolkenstrukturen durchgeführt worden (Breon, 1992; Barker und Davies, 1992; Cahalan et al., 1994; Marshak et al., 1995a,b). Diese variierten auch nicht in allen drei Raumrichtungen, sondern berücksichtigen lediglich horizontale Änderungen der optischen Dicke.

Erst die Verfügbarkeit kleinskaliger dreidimensionaler Atmosphärenmodelle mit integrierter Wolkenphysik ermöglicht die Verwendung vollständig dreidimensionaler Wolkenstrukturen im Strahlungstransport (Oreopoulos und Barker, 1999; Barker et al., 1999).

Im Falle von Mischphasenwolken kommt erschwerend hinzu, dass auch das unterschiedliche Streuverhalten von Wassertröpfchen, Regentropfen und Eisparkeln zu berücksichtigen ist. Eine wenn auch grobe Abschätzung des Eisanteils in der bewölkten Atmosphäre ist Lin und Rossow (1996) mittels der Kombination von Satellitenmessungen der Mikrowellenemissionen (empfindlich gegenüber Flüssigwasser) und der solaren Reflexion (empfindlich gegenüber Flüssigwasser und Eis) gelungen. Sie erhalten für nichtregnende Wolken über den Ozeanen ein global gemittelt Verhältnis von Eiswasserpfad zu Flüssigwasserpfad von 0.7.

Die seit einigen Jahren verfügbaren Wolkenradargeräte zeigen ebenfalls eine hohe Eishäufigkeit, selbst in mittelhoher schwach-konvektiver sommerlicher Bewölkung (Markus Quante 2001, persönliche Mitteilungen). In der Wolkenradarmessung offenbart sich die Eisphase durch die Depolarisation des reflektierten Signals an den nicht-sphärischen von Außen bereits angeschmolzenen Eisparkeln. Man erkennt also den Übergangsbereich zwischen fester und flüssiger Phase.

In Abb. 8 ist exemplarisch eine Zeitreihe der Reflektivität und der Vertikalgeschwindigkeit aufgenommen vom GKSS Wolkenradars MIRACLE am 2. August 2001 dargestellt. Die plötzlich einsetzenden abwärts gerichteten Fallgeschwindigkeiten markieren das Einsetzen von Niederschlag,

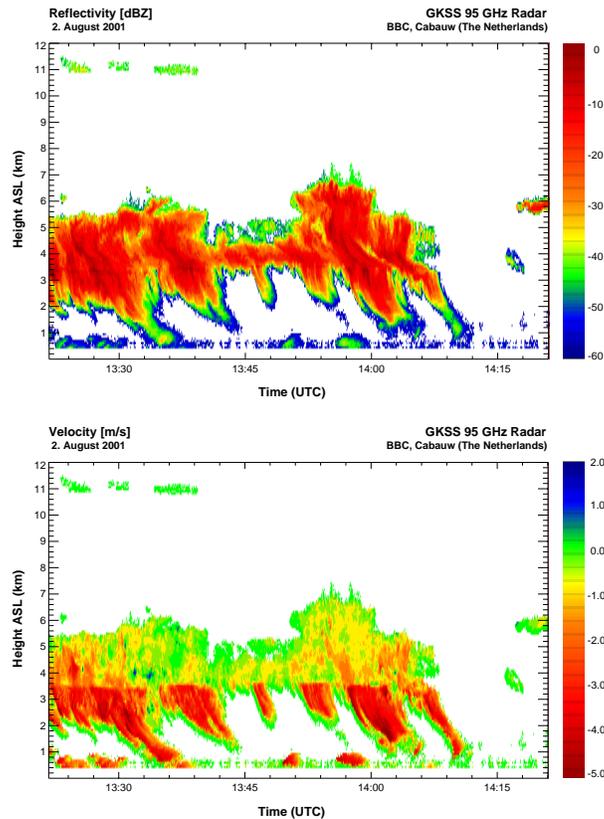


Abbildung 8: Zeitserie der Reflektivität (oben) und Partikelfallgeschwindigkeit (unten), aufgenommen mit dem GKSS Wolkenradar MIRACLE am 2. August 2001 im Rahmen der BBC Mes-skampagne des EU-Vorhabens CLIWA-NET.

der wiederum in unseren Breiten hauptsächlich über die Eisphase entstehen kann (Bergeron-Findeisen-Prozess). Oberhalb dieses Knickes koexistieren unterkühlte Wassertropfen und Eispartikel.

Man kann also davon ausgehen, dass eine Kombination aus Flüssigwasser und Eis eher die Regel als die Ausnahme in atmosphärischer Bewölkung ist.

Zur Simulation dreidimensionaler Mischphasenwolken haben wir das dreidimensionale nichthydrostatische Atmosphärenmodell GESIMA (Eppel et al., 1995) mit einer Wolkenparametrisierung von Levkov et al. (1992), modifiziert von Hagedorn (1996), verwendet. Die Wolkenparametrisierung unterscheidet Wolkentröpfchen, Regentropfen, Schnee und Eis. Abbildung 9 zeigt exemplarisch die zeitliche Entwicklung einer GESIMA-Wolke. Dargestellt ist die räumliche Verteilung des Volumenextinktionskoeffizienten. Die horizontale Auflösung beträgt 2 km. Die vertikale Auflösung ist 100 m am Boden und sinkt auf 1 km in 10 km Höhe. Mit  $52 \times 52 \times 26$  horizontalen und vertikalen Gitterzellen entspricht das gesamte Modellgebiet in etwa einer einzelnen Gitterzelle eines globalen atmosphärischen Zirkulationsmodelles. Um halbwegs unabhängige Wolkenrealisierungen zu erlangen ist bei einem Modellzeitschritt von 10 Sekunden alle 10 Minuten das GESIMA-Ergebnis als einzelne Wolken herausgenommen worden. Die hier verwendeten Wolken sind von v. Bremen et al. (2001) erstellt worden.

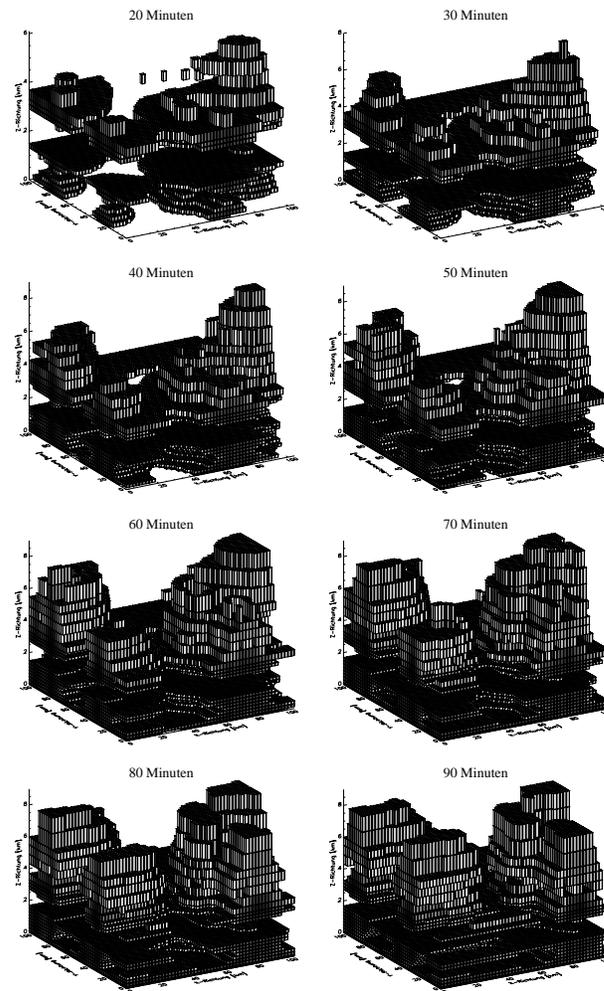


Abbildung 9: Zeitserie der Wolkenentwicklung des Modells GESIMA. Aus Scheirer (2001).

### 3.2 Strahlungstransportmodellierung

Das Ziel unserer Arbeiten ist die Realisierung des komplett dreidimensionalen Strahlungstransportes. Damit ist die Berücksichtigung dreidimensionaler Strukturen des Volumenextinktionskoeffizienten, des Streuverhaltens und der Absorption gemeint. Durch die unterschiedlichen Anteile von Wassertröpfchen, Regen, Schnee und Eis in den GESIMA-Zellen ist diese Variabilität in den Wolkenfeldern gewährleistet. Das Streu- und Absorptionsverhalten der kugelförmigen Wassertröpfchen wird mit der Methode der Mie-Theorie berechnet, für Regentropfen haben Macke und Grossklau (1998) ein GOM-Verfahren entwickelt, das die nichtsphärische Tropfenform berücksichtigt. Schnee wird als großer irregulärer Kristall betrachtet und mit dem fraktalen Polykristall realisiert. Für Eis schließlich wird die Geometrie hexagonaler Säulen angenommen. Jeder Partikeltyp wird über experimentell gewonnene oder theoretische Größenverteilungen gemittelt, so dass verteilungsgemittelte Streu- und Absorptionseigenschaften als Funktion des effektiven Radius zur Verfügung stehen. Dies gilt für 14 Spektralbereiche, die das gesamte solare Spektrum abdecken. Damit steht eine umfangreiche Datenbank zur Anwendung in Wolkenstrahlungsbilanz und Fernerkundung zur Verfügung.

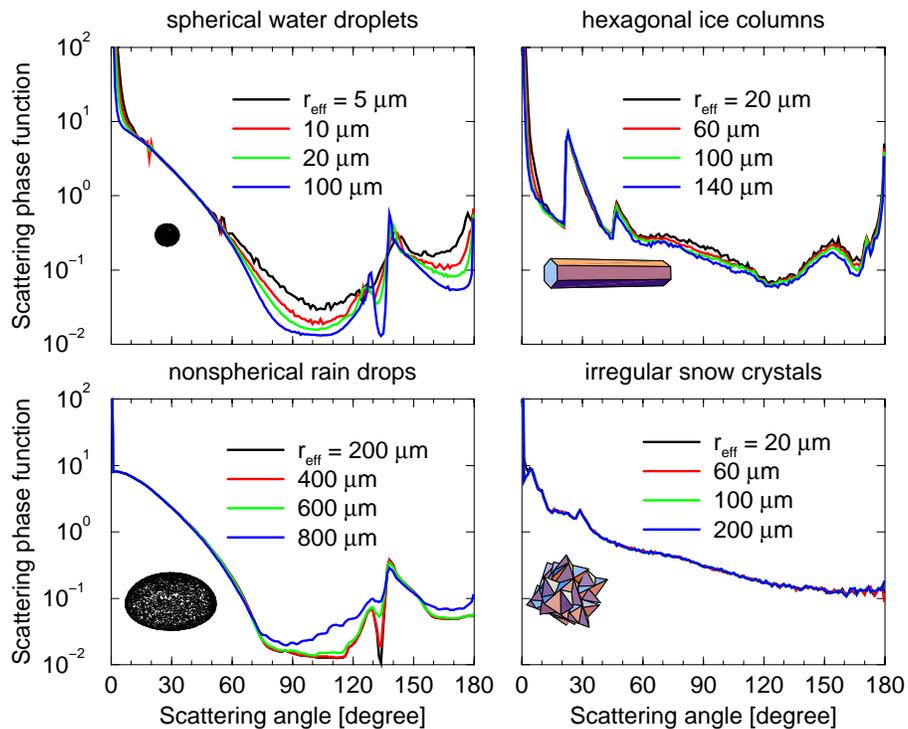


Abbildung 10: Streufunktionen sphärischer Wassertropfchen, asphärischer Regentropfen, irregulär geformter Schneepartikel und hexagonaler Eispartikel im sichtbaren Spektralbereich als Funktion des effektiven Partikelradius.

Abbildung 10 zeigt exemplarisch die Streufunktionen der vier Partikeltypen für den sichtbaren Spektralbereich und als Funktion des effektiven Radius. Man erkennt die Ausprägung der Regenbogenmaxima der kugelförmigen Wassertropfchen mit zunehmender Größe, die Glättung der Regentropfenstreuung mit zunehmender Asphärizität, die leichten Änderungen in den Streufunktionen hexagonaler Säulen aufgrund der größenabhängigen Achsenverhältnisse und schließlich die nahezu konstante Streufunktion des fraktalen Polykristalls, dessen Form nicht größenabhängig ist.

Die Umsetzung der GESIMA-Größen Wassergehalt und Partikelanzahldichte in die für den Strahlungstransport relevanten Größen Volumenextinktionskoeffizient und effektiven Radius ist je nach Partikeltyp unterschiedlich durchgeführt worden. Details sind in Macke et al. (1999) beschrieben. Dort haben wir für den nichtabsorbierenden sichtbaren Spektralbereich den Einfluss unterschiedlicher Vereinfachungen in der Wolkendarstellung auf die Ergebnisse der Strahlungstransportrechnungen untersucht. Unterschieden wurden folgende Fälle:

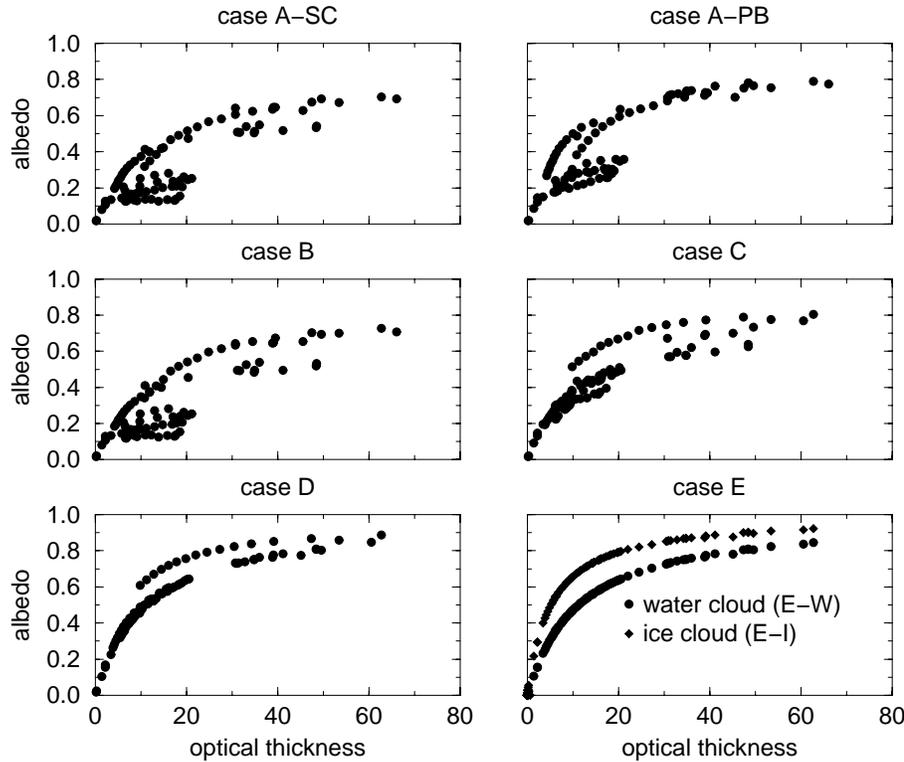


Abbildung 11: Albedo im sichtbaren (nichtabsorbierenden) Spektralbereich als Funktion der optischen Dicke für die sechs Darstellungen der Bewölkung im Strahlungstransport. Weitere Erklärungen im Text. Aus Macke et al. (1999).

Fall	Beschreibung
A-SC	dreidimensionale Inhomogenität der Extinktionskoeffizienten und Streueigenschaften, offene Ränder des Modellgebietes.
A-PB	wie Fall A-SC, aber mit periodischen Randbedingungen.
B	wie Fall A-SC, aber mit konstanten Streu- und Absorptionseigenschaften.
C	wie Fall B, aber mit konstantem Extinktionskoeffizienten.
D	wie Fall C, aber mit horizontaler Homogenisierung.
E-W	wie Fall D, aber mit a priori Streu- und Absorptionsverhalten (Wassertröpfchenverteilung mit $10 \mu\text{m}$ effektivem Radius).
E-I	wie Fall E-W, aber mit Eiskristallverteilung mit $30 \mu\text{m}$ effektivem Radius.

Fall A entspricht dem tatsächlichen Strahlungstransportproblem, aufgespalten in die Situation einer einzeln stehenden Wolke (A-SC) und eines Wolkenfeldes mit starker horizontaler Kopplung (A-PB). Fall B entspricht der aktuell üblichen Modellsituation, dreidimensionale Wolkenstrukturen allein in der optischen Dichte der Wolke, nicht aber in den Streueigenschaften zuzulassen. Die Fälle C und D beschreiben eine komplett homogenisierte Wolke, zum einen als isolierter Wolkenblock (C) und zum anderen als stratiforme Wolke (D). Fall D entspricht der Situation des klassischen Strahlungstransportes, wobei hier aber immerhin die wahre mittlere Streufunktion verwendet wird. Da diese in der Praxis nicht bekannt ist, muss man eher Fall E als typisch ansehen.

Insgesamt wurden vier Wolkenszenarien untersucht, die den Bedingungen konvektiver Sommer-

bewölkung (Fall I), stratiformer Winterbewölkung (Fall II), stratiformer Sommerbewölkung (Fall III) und konvektiver Spätsommerbewölkung (Fall IV) entsprechen (Hagedorn, 1996).

Abbildung 11 zeigt den Verlauf der gebietsgemittelten Albedo als Funktion der mittleren optischen Dicke für die sechs Darstellungen der Wolken im Strahlungstransport. Die Fälle E und D spiegeln den für planparallele homogene Wolken bekannten konvexförmigen Zusammenhang wieder. Variable Streueigenschaften (Fall D) ergeben im wesentlichen zwei konvexe Kurven, je nachdem ob mehr Eis oder Flüssigwasser in den oberen für den Strahlungstransport relevanten Schichten vorliegt. Eine beträchtliche Reduzierung der Albedo wird durch dreidimensionale endliche Wolkengeometrien erreicht, da die Photonen nun in der Lage sind, durch die Wolkenseiten hindurchzugehen. Diese Reduzierung hängt stark vom Achsenverhältnis der Wolke ab und verrauscht entsprechend den Zusammenhang zwischen Albedo und optischer Dicke.

Eine weitere Reduzierung der Albedo wird durch die räumliche Inhomogenität des Volumenextinktionskoeffizienten erreicht. Die bekannte Ursache hierfür ist der oben genannte nichtlineare konvexe Zusammenhang zwischen Albedo und optischer Dicke. Erwartungsgemäß ist diese Reduzierung am stärksten für die inhomogensten konvektiven Wolken.

Insgesamt sind (bei fester optischer Dicke) im Falle isolierter Wolken die Wolkenachsenverhältnisse der entscheidende Parameter für den Strahlungstransport, im Falle horizontal ausgedehnter Bewölkung dagegen die interne Wolkeninhomogenität. Die räumliche Inhomogenität der Streueigenschaften spielt eine untergeordnete Rolle. Wie unsere jüngsten (noch unveröffentlichten) Untersuchungen zeigen, gilt letzteres allerdings tatsächlich nur für den sichtbaren Spektralbereich. Räumlich inhomogene Absorptionen der Hydrometeore beeinflussen den Strahlungstransport im solaren Infrarot beträchtlich, und haben noch im Mittel über den gesamten solaren Spektralbereich einen merkbaren Einfluss auf die gebietsgemittelten spektralen Strahlungsflussdichten.

### 3.3 Fehlerabschätzung klassischer Modelle

Die klassische und nachwievor weit verbreitete Wolkenstrahlungstransportmodellierung reduziert die räumliche Wolkenstruktur zu horizontal planparallele homogene (PPHOM) Schichten. Trotz der bekannten Fehler der PPHOM-Annahme wird diese auch heute noch in der Klimamodellierung verwendet, da zur Zeit keine Alternativen zur Verfügung steht, subskalige Strahlungstransportprozesse geeignet zu parametrisieren (siehe aber Abschnitt 3.4!). Die derart fehlerhaft modellierten Strahlungsflussdichten werden zumeist grob an experimentell gewonnene Strahlungsklimatologien angepasst.

Um die Fehler der PPHOM-Methode abzuschätzen, haben Scheirer und Macke (2001a) und Scheirer und Macke (2001b) die Ergebnisse der dreidimensionalen Strahlungstransportrechnungen mit denen äquivalenter eindimensionaler Rechnungen verglichen. Hierbei werden zwei PPHOM-Fälle unterschieden:

1) Alle bewölkten Säulen werden zu einer planparallel homogenen Wolke zusammengefasst, die in jeder Vertikalschicht die gemittelten Eigenschaften aller bewölkten Säulen hat (wird hier als PPHOM bezeichnet). Dies stellt die größte Näherung dar, liefert also den größten Fehler und kommt immer dann zum tragen, wenn keinerlei subskalige Wolkeninformation vorliegt.

2) Jede bewölkte Säule wird als PPHOM-Fall gerechnet und die Ergebnisse aller Wolken werden anschließend gemittelt (engl. *Independent Column Approximation* ICA). Dies entspricht der optimalen Lösung unter Verwendung eines eindimensionalen Strahlungstransportmodelles, setzt aber die Kenntnis der subskaligen Wolkenstruktur voraus.

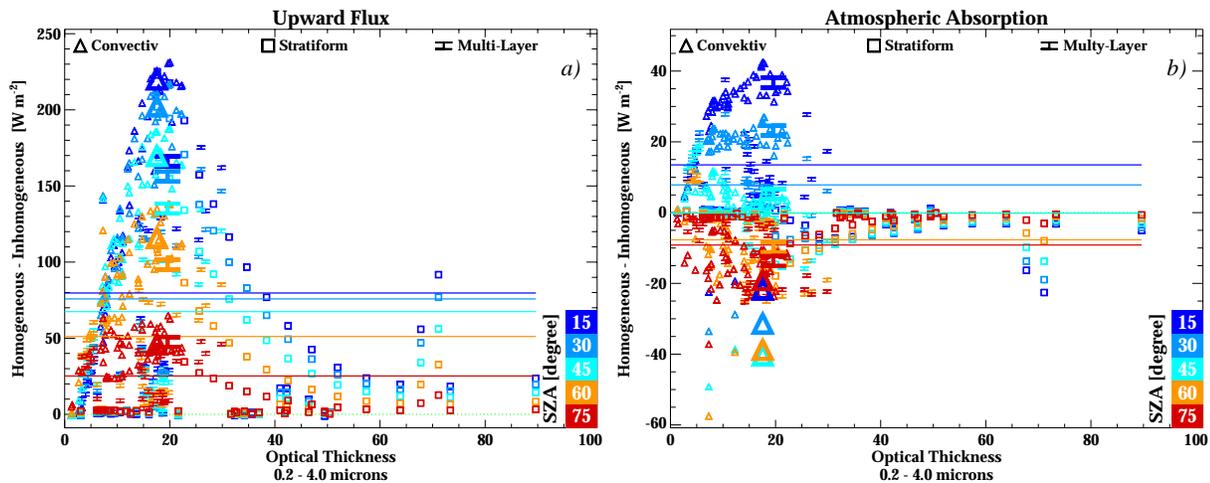


Abbildung 12: Differenzen der solar breitbandigen Strahlungsflussdichten zwischen PPHOM- und 3D-Strahlungstransportrechnungen Aus Scheirer (2001).

Eine Abschätzung der mit diesen Annahmen verbundenen Fehler wurde auch von Oreopoulos und Barker (1999) und Barker et al. (1999) vorgenommen, allerdings ist dort 1) der dreidimensionale Strahlungstransport auf den Volumenextinktionskoeffizient beschränkt, während in unseren Rechnungen auch Streu- und Absorptionseigenschaften räumlich variabel sind und 2) wurden nur wenige exemplarische Wolkenrealisierungen herangezogen, während hier eine Vielzahl von Wolken untersucht wurde, um eine konkrete Abhängigkeit der Fehler von der optischen Dicke zu ermitteln.

Abbildung 12 demonstriert eindrucksvoll, dass die Annahme homogener Bewölkung zu erheblichen Überschätzungen der breitbandigen reflektierten Strahlungsflussdichten bis zu  $230 \text{ Wm}^{-2}$  führt, insbesondere bei hohen Sonnenständen und konvektiver Bewölkung. Hier wirken horizontale Wolkenlücken im dreidimensionalen Strahlungstransport als sehr effiziente "Transmitter". Die Absorption wird für hohe Sonnenstände um bis zu  $40 \text{ Wm}^{-2}$  überschätzt und für niedrige Sonnenstände um bis zu  $-40 \text{ Wm}^{-2}$  unterschätzt. Selbst im Mittel über alle Wolkenrealisierungen liegen die Fehler in der Reflexion bei etwa  $70 \text{ Wm}^{-2}$ , während sie sich in der Absorption zufälligerweise herausmitteln.

Abbildung 13 zeigt, dass die Fehler der ICA deutlich geringer sind als die vermittelt der Annahme komplett homogener Bewölkung und im Mittel über alle Wolkenrealisierungen sogar nahezu verschwinden! Damit ist im Mittel die Verwendung klassischer eindimensionaler Strahlungstransportmodelle in der Klimamodellierung vertretbar, vorausgesetzt man wendet diese auf eine realistische kleinskalige Wolkenverteilung an. So erhalten wir für unsere Gesamtheit komplexer Mischphasenwolken qualitativ das gleiche Ergebnis wie Barker et al. (1999) für einige exemplarische Wasserwolken.

Es bleibt das Problem, dreidimensionale Verteilungen aus den grob aufgelösten Klimamodellgitterzellen zu parametrisieren. Außerdem kann eine klimarelevante Größe, die nur im Mittel richtig getroffen ist, durch aktuell hohe Abweichungen unrealistisch auf den Gesamtzustand des Systems wirken. Dies gilt in unserem Falle z.B. immer dann, wenn der Strahlungseinfluss nichtlinear auf die Erwärmungs- und Abkühlungsraten des Systems Erde/Atmosphäre wirkt.

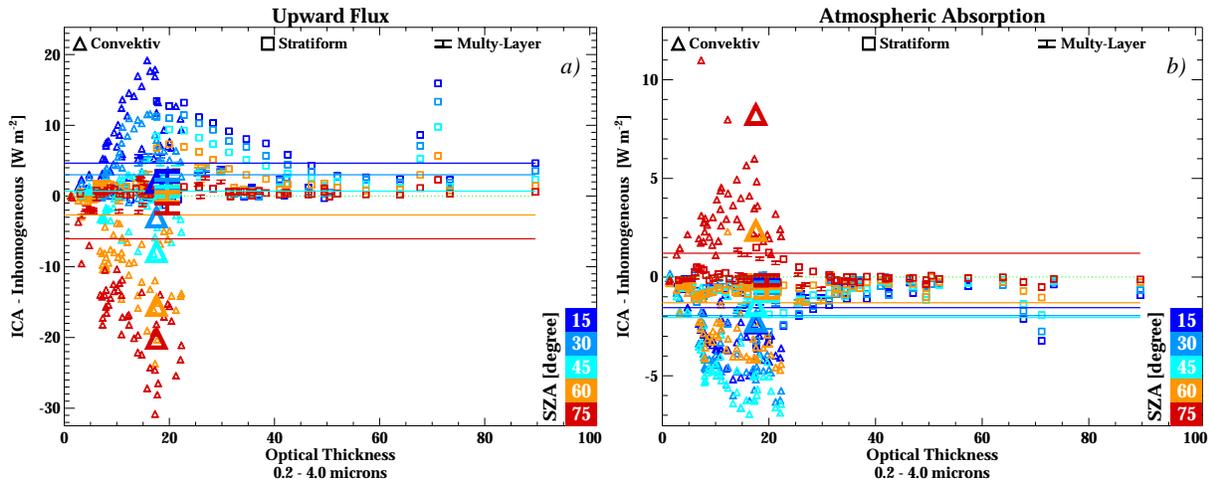


Abbildung 13: Differenzen der solar breitbandigen Strahlungsflussdichten zwischen ICA- und 3D-Strahlungstransportrechnungen Aus Scheirer (2001).

### 3.4 Parametrisierung der solaren Strahlungsflussdichten in großskaligen Modellen

Wie in Abschnitt 3.3 gezeigt, führt die Homogenisierung der dreidimensionalen Wolkenstruktur zu inakzeptabel großen Fehlern in den Strahlungsflussdichten. Kennt man dagegen die Wolkenstruktur, so scheint die ICA eine praktikable Näherung zu sein. In der Praxis ist die für den Strahlungstransport relevante räumliche Struktur der Bewölkung aber nicht bekannt. Wir haben also gewissermassen das Werkzeug zur realistischen Strahlungstransportmodellierung zur Hand, nicht aber das Material. Mit folgendem Ansatz haben wir versucht, mittels statistischer Methoden diesen “Materialmangel” zu umgehen (Schewski et al., 2001; Schewski, 2001).

Sind die gebietsgemittelten Strahlungsflussdichten eines dreidimensional inhomogenen Wolkengebietes mit den ebenso gemittelten Wolkeneigenschaften korreliert, so lässt sich aus der Realisierung hinreichend vieler Wolkenszenarien eine statistische Parametrisierung der Strahlungsflussdichten gewinnen. Die Güte der Korrelation ist gleichzeitig ein Maß für den funktionellen Zusammenhang zwischen mittleren Wolken- und Strahlungseigenschaften, dem in der Anwendung noch ein “natürliches Rauschen” aufaddiert werden müsste.

Zum Zwecke der Parametrisierung haben wir mit Hilfe des Atmosphärenmodells GESIMA 168 Wolkengebiete realisiert und mit unserem Monte Carlo Strahlungstransportmodell für jede Realisierung  $i$  die gebietsgemittelten solar breitbandigen Reflexion  $R$  am Oberrand, die Absorption  $A$  innerhalb und die direkte  $T_{dir}$ , diffuse  $T_{dif}$  und Gesamttransmission  $T_{ges}$  am Unterrand des Modellgebietes berechnet und als gebietsgemittelten “Strahlungsvektor”

$$\underline{\mathbf{R}}_i = [R, A, T_{ges}, T_{dif}, T_{dir}]_i, \quad i = 1, 168 \quad (1)$$

zusammengefasst. Ebenso wird der mittlere Zustand des bewölkten Gebietes mit Hilfe des “Wolkenvektors”

$$\underline{\mathbf{C}}_i = [LWP, IWP, RWP, SWP, N, H, T, Z_{bot}]_i, \quad i = 1, 168 \quad (2)$$

$R$	$A$	$T_{ges}$	$T_{dif}$	$T_{dir}$
LWP	H	LWP	N	N
0.802	0.846	0.927	0.648	0.941
LWP, N	H, T	LWP, SWP	LWP, N	LWP, N
0.929	0.899	0.957	0.945	0.979
LWP, RWP, N	IWP, H, T	LWP, RWP, SWP	LWP, N, CH	LWP, SWP, N
0.957	0.924	0.971	0.968	0.982

Tabelle 1: Optimale Wolkenparameter bei Ein-, Zwei- und Dreikomponentenparametrisierung gemäß Gl. (3) und die daraus folgenden Korrelationskoeffizienten zwischen tatsächlichen und parametrisierten Strahlungsflussdichten. Aus Schewski (2001).

charakterisiert, wobei  $LWP$ ,  $IWP$ ,  $RWP$ ,  $SWP$  die mittleren Wasserpfade für Wolkenröpfchen, Eis, Regen und Schnee sind,  $N$  der Bedeckungsgrad,  $H$  die mittlere vertikale Erstreckung der Wolke,  $T$  die Wolkenoberkantentemperatur und  $Z_{bot}$  schließlich die Höhe der Wolkenunterkante.

Prinzipiell lassen sich erheblich mehr mittlere Wolkenparameter konstruieren, z.B. die Wassergehalte, Temperaturen und Bedeckungsgrade jeder Vertikalschicht. Hierzu müsste aber auch der Strahlungsvektor  $\mathbf{R}_i$  vertikal aufgelöst werden, und sowohl Wolken- als auch Strahlungsvektor wären für eine Korrelation auf der Basis von 168 Wolken extrem überdimensioniert. Damit steckt aber noch ein großes Potential in dieser Art der Wolken-Strahlungskorrelation, wenn man nur hinreichend viele Wolkenrealisierungen zur Hand hat. Unter dieser Bedingung wäre auch ein Neuronales Netz die Methode der Wahl, um den nichtlinearen Zusammenhang  $\mathbf{F}_i = f(\mathbf{C}_i)$  zwischen mittleren Wolken- und mittleren Strahlungseigenschaften herzustellen. Aufgrund der gerade noch machbaren, aber dennoch eher kleinen Zahl von 168 Wolken haben wir allerdings eine einfache quasi-lineare Parametrisierung der Form

$$F_j = a_j + \sum_{k=1}^{N_C} b_{jk} C_k^{\frac{1}{2}} + c_{jk} C_k + d_{jk} C_j^2 \quad (3)$$

durchgeführt, wobei  $N_C$  die Anzahl der verwendeten Wolkenparameter ist. Ein Element des Strahlungsvektors  $F_j$  wird also linear mit der Summe aus der Wurzel der Elemente des Wolkenvektors, deren Quadrat und den Wolkenvektorelementen selbst korreliert. Damit werden nichtlineare Abhängigkeiten zumindest teilweise berücksichtigt.

Da die so konstruierte Parametrisierung für zu große  $N_C$  die Strahlungseigenschaften der hier verwendeten Wolken zwar sehr gut abbilden, aber jegliche Allgemeingültigkeit verliert, haben wir uns für jedes Element des Strahlungsvektors auf diejenigen drei Wolkenparameter beschränkt, die in der Parametrisierung die höchste Korrelation mit den tatsächlichen Strahlungsflüssen liefern.

So ergibt sich z.B. der Anteil der gebietsgemittelten reflektierten breitbandigen Solarstrahlung mit einer Korrelation von 0.957 aus den mittleren Wasserpfaden für Wolkenröpfchen und Regen sowie aus dem Wolkenbedeckungsgrad (siehe Tab. 1). Da die Mehrheit der hier verwendeten Wolken hauptsächlich aus Wolken- und Regenwasser und weniger aus Eis und Schnee bestehen, ist die Auswahl der Wolkenparameter nicht verwunderlich. Bemerkenswert ist aber, dass trotz der komplexen dreidimensionalen Strahlungstransportrechnungen die gebietsgemittelten Strahlungsflussdichten hoch mit den gebietsgemittelten Atmosphäreigenschaften korreliert sind. Würde man die gleiche Parametrisierung mit horizontal komplett homogenisierten (PPHOM) Wolken durchführen, wären die Korrelationen nur unwesentlich höher. Lediglich die Koeffizienten der Pa-

rametrisierung würden sich erheblich von denen der dreidimensionalen Rechnungen unterscheiden, da die “Physik” in diesem Fall eine andere wäre.

Wir erhalten also für den komplett dreidimensionalen Strahlungstransport im Gebietsmittel qualitativ ähnlich hohe Korrelationen zwischen Wolken- und Strahlungseigenschaften wie im klassischen PPHOM Fall. Damit erscheint eine Parametrisierung der subskaligen Strahlungsbilanz im Klimamodell als realistische Aufgabe.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten Arbeiten haben zum Ziel, die Modellierung des solaren Wolkenstrahlungstransportes so realistisch wie möglich zu gestalten sowie den Fehler aufgrund verschiedener weitverbreiteten Vereinfachungen als auch den Unsicherheitsbereich aufgrund der mangelnden Kenntnis kleinskaliger Wolkeneigenschaften abzuschätzen. Dabei geht es konkret um die geometrischen Aspekte des Strahlungstransports, d.h. um Form, Größe und räumliche Verteilung der atmosphärischen Hydrometeore. Während die mikrophysikalischen Eigenschaften, d.h. Form und Größe der Partikel, für Cirruswolken eine entscheidende Rolle spielen, stellen die makroskopischen Eigenschaften, d.h. die dreidimensionale Struktur der Wolken, die große Herausforderung für die solaren Strahlungstransportrechnungen in tiefen und mittelhohen Wolken dar.

Die von mir auf der Basis der Geometrischen Optik entwickelten Einfachstreuemodelle erlauben die Behandlung beliebig komplex geformter inhomogener Partikel und haben sich in der Modellierung des Strahlungstransportes in Cirruswolken bewährt. Auch wenn die physikalisch sinnvollere Bestimmung der Streu- und Absorptionseigenschaften aus Modellrechnungen anhand beobachteter Kristallgeometrien aus messtechnischen und theoretischen Gründen noch längere Zeit unmöglich sein wird, so erlauben unsere jetzigen Streuamodelle doch eine Bestimmung realistischer Eigenschaften aus der Minimierung der Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Strahl-dichten unter Variation der geometrischen (Form) und materiellen (Trübung durch Einschlüsse) Kristalleigenschaften. Dies wird im Hinblick auf bereits existierende und zukünftige Satellitensensoren eine vielversprechende Anwendung sein. Insbesondere die Klassifizierung der so gewonnenen Streufunktionen in bestimmte physikalische Regimes wie z.B. Eiswassergehalt, Temperatur oder Feuchte, wird der Strahlungstransportmodellierung im Klimamodell wertvolle Dienste leisten.

Dennoch werden stets Unsicherheiten in den Strahlungseigenschaften der Cirrusbewölkung verbleiben, die wir aber zumindest quantifizieren müssen, wie wir es schon am Beispiel der zumeist unbekanntem Eiskristallgrößenverteilung hinsichtlich der solaren Strahlungsbilanz getan haben.

Auf der Basis meiner Einfachstreuemodelle für nicht-sphärische Partikel (Eis- und Schneekristalle, Graupel und Regentropfen) war es ein konsequenter Schritt hin zur Behandlung des komplett dreidimensionalen Vielfachstreuproblems, d.h. hin zur Berücksichtigung dreidimensional inhomogener Extinktionskoeffizienten, Streu- und Absorptionseigenschaften, wie sie in Mischphasenwolken zu erwarten sind. Hierzu haben wir Monte Carlo Strahlungstransportmodelle entwickelt, die in akzeptabler Rechenzeit gebietsgemittelte solare Strahlungsflussdichten für vorgegebene Wolkenstrukturen berechnen. Die hier verwendeten Modellwolken des mesoskaligen Atmosphärenmodells GESIMA sind sicher nicht repräsentativ für die globale Verteilung atmosphärischer Wolken, aber dennoch können wir anhand der Strahlungstransportergebnisse dieser eingeschränkten “Grundgesamtheit” von Wolkenrealisierungen einige prinzipielle Aussagen treffen.

So stellen die räumlich variablen Streueigenschaften im nichtabsorbierenden sichtbaren Spektralbereich eine eher vernachlässigbare Wolkeneigenschaft dar, wohingegen die räumlich variablen Absorptionseigenschaften im solaren Infrarot eine große Rolle spielen, die sich auch noch in den

solar breitbandigen Strahlungsflussdichten zeigen. Wie von anderen Autoren schon exemplarisch für reine Wasserwolken gezeigt, ist auch im Falle der sehr viel komplexeren Mischphasenwolken die ICA eine akzeptable Näherung für die gebietsgemittelten Strahlungsgrößen. Damit lassen sich die zur Zeit in den Klimamodellen verwendeten eindimensionalen Strahlungstransportmodelle weiterhin verwenden, wenn man nur eine realistische Vorstellung von der subskaligen Wolkeninhomogenität hat. Wie wir aber auch zeigen konnten, ist eine Anpassung der gebietsgemittelten Strahlungsflussdichten inhomogener Bewölkung an gebietsgemittelten Wolkeneigenschaften möglich. Damit öffnet sich der Weg zu einer statistischen Strahlungsbilanzparametrisierung, die aber eine weitaus größere und repräsentativere Wolkenmenge voraussetzt als sie im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten erreichbar war.

Letztlich müssen die hier getroffenen Aussagen qualitativ und quantitativ durch Experimente verifiziert werden. So schwer die gleichzeitige Erfassung der instantanen dreidimensionalen Wolkenstruktur und deren gebietsgemittelten Strahlungseigenschaften auch ist, so wird die technische und fernerkundliche Entwicklung in der Kombination aus aktiver und passiver bodengebundener (Löhnert et al., 2001) sowie aus bodengebundener und satellitengetragener Wolkenfernerkundung (van Lammeren et al., 2000) langfristig den Zusammenhang zwischen Wolkenstruktur und deren Strahlungseigenschaften zumindest an einigen Fallbeispielen enthüllen und damit einerseits Prüfsteine für die Modellierung der Wolkenphysik und den Wolkenstrahlungstransport legen und andererseits zur stärkeren Kooperation beider Forschungsgebiete beitragen.

## Literatur

- Auer, A. H. und Veal, D. L., 1970. The dimensions of ice crystals in natural clouds. *J. Atmos. Sci.*, 27, 919–926.
- Barker, H., Stephens, G., und Fu, Q., 1999. The sensitivity of domain-averaged solar fluxes to assumptions about cloud geometry. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 125, 2127–2152.
- Barker, H. W. und Davies, J. A., 1992. Solar radiative fluxes for stochastic, scale-invariant broken cloud fields. *J. Atmos. Sci.*, 49, 1115–1126.
- Breon, F.-M., 1992. Reflectance of broken cloud fields: Simulation and parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 49, 1221–1232.
- Brogniez, G., Buriez, J., Giraud, V., Parol, F., und Vanbauce, C., 1995. Determination of effective emittance and a radiatively equivalent microphysical model of cirrus from ground-based and satellite observations during the International Cirrus Experiment: The 18 October case study. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 1025–1036.
- Cahalan, R. F., Ridgway, W., Wiacombe, W. J., Bell, T. L., und Snider, J. B., 1994. The albedo of fractal stratocumulus clouds. *J. Atmos. Sci.*, 51(16), 2434–2455.
- Cairns, B., Lacis, A., und Carlson, B., 2000. Absorption within inhomogeneous clouds and its parameterization in general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 57, 700–714.
- Cess, R. und Co-Autoren, 1995. Absorption of solar radiation by clouds - Observations versus models. *Science*, 267, 496–499.
- Chepfer, H., Brogniez, G., Sauvage, L., Flamant, P., Trouillet, V., und Pelon, J., 1999. Remote sensing of cirrus radiative parameters during EUCREX'94. Case study of 17 April 1994. part II: Microphysical models. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 504–518.

- Doutriaux-Boucher, M., Buriez, J.-C., Brogniez, G., Labonnote, L., und Baran, A., 2000. Sensitivity of retrieved POLDER directional cloud optical thickness to various ice particle models. *Geophys. Res. Lett.*, 27(1), 109–112.
- Eppel, D. P., Kapitza, H., Clausen, M., Jacob, D., Koch, W., Levkov, W., Mengelkamp, H.-T., und Werrmann, N., 1995. The non-hydrostatic mesoscale model GESIMA. Part II: Parameterizations and applications. *Contr. Atmos. Phys.*, 68, 15–41.
- Evans, K., 1998. The spherical harmonics discrete ordinate method for threedimensional atmospheric radiative transfer. *J. Atmos. Sci.*, 55, 429–446.
- Francis, P., Hignett, P., und Macke, A., 1998. The retrieval of cirrus cloud properties from aircraft multi-spectral reflectance measurements during EUCREX'93. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 124, 1273–129.
- Francis, P. N., 1995. Some aircraft observations of the scattering properties of ice crystals. *J. Atmos. Sci.*, 52, 1142–1154.
- Fritz, S. und MacDonald, T., 1951. Measurements of absorption by clouds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 32, 205–209.
- Gayet, J.-F., Crepel, O., und Fournol, J.-F., 1995. A new polar nephelometer for in situ measurements of microphysical and optical properties of clouds. In *Proceedings of the AMS Conference on Cloud Physics, Dallas, Texas, January 15-20, 1995*, Seiten 26–30.
- Hagedorn, R., 1996. *Hydrologiebilanz im Geesthachter Simulationsmodell der Atmosphäre (GESIMA) als Test der mikrophysikalischen Parametrisierung*. Diplomarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Christian-Albrecht-Universität zu Kiel.
- Hansen, J. E. und Travis, L. D., 1974. Light scattering in planetary atmospheres. *Space Sci. Rev.*, 16, 527–610.
- Kinne, S., Ackermann, T. A., Heymsfield, A. J., Valero, F. P. J., Sassen, K., und Spinhirne, J., 1992. Cirrus microphysics and radiative transfer: Cloud field study on 28 October 1991. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 661–684.
- Kristjansson, J., Edwards, J., und Mitchell, D., 1999. A new parameterization scheme for the optical properties of ice crystals for use in general circulation models of the atmosphere. *Phys. Chem. Earth (B)*, 24, 231–236.
- Kristjansson, J., Edwards, J., und Mitchell, D., 2000. Impact of a new scheme for optical properties of ice crystals on climates of two gcms. *J. Geophys. Res.*, 105, 10 063–10 079.
- Labonnote, L., Brogniez, G., Buriez, J., Doutriaux-Bouchert, M., Gayet, J., und Macke, A., 2001. Polarized light scattering by inhomogeneous hexagonal monocrystals. validation with ADEOS-POLDER measurements. *J. Geophys. Res.*, 106(D11), 12,139–12,153.
- Labonnote, L., Brogniez, G., Doutriaux-Boucher, M., Buriez, J.-C., Gayet, J.-F., und Chepfer, H., 2000. Modeling of light scattering in cirrus clouds with inhomogeneous hexagonal monocrystals. Comparison with in-situ and ADEOS-POLDER measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 27(1), 113–116.

- Levkov, L., Rockel, B., Kapitzka, H., und Raschke, E., 1992. 3d mesoscale numerical studies of cirrus and stratus clouds by their time and space evolution. *Contr. Atmos. Phys.*, 65, 35–58.
- Lin, B. und Rossow, W. B., 1996. Seasonal variation of liquid and ice water path in nonprecipitating clouds over oceans. *J. Climate*, 9, 2890–2902.
- Liou, K.-N., 1986. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective. *Mon. Wea. Rev.*, 114, 1167–1199.
- Löhnert, U., Crewell, S., Macke, A., und Simmer, C., 2001. Profiling cloud liquid water by combining active and passive microwave measurements with cloud model statistics. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18(8), 1354–1366.
- Lovejoy, S. und Schertzer, D., 1990. Multifractals, universality classes and satellite and radar measurements of cloud and rain fields. *J. Geophys. Res.*, 95(D3), 2021–2034.
- Macke, A., 2000. Monte Carlo calculations of light scattering by large particles with multiple internal inclusions. In M. I. Mishchenko, J. W. Hovenier, und L. Travis, Herausgeber, *Light scattering by nonspherical particles*, Kapitel 10, Seiten 309–322. Academic Press.
- Macke, A., Francis, P. N., McFarquhar, G. M., und Kinne, S., 1998. The role of ice particle shapes and size distributions in the single scattering properties of cirrus clouds. *J. Atmos. Sci.*, 55(17), 2874–2883.
- Macke, A. und Grossklauß, M., 1998. Light scattering by nonspherical raindrops: implications for lidar remote sensing of rainrates. *J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer*, 60(3), 355–363.
- Macke, A., Mishchenko, M. I., Miunonen, K., und Carlson, B. E., 1995. Scattering of light by large nonspherical particles: ray tracing approximation versus T-matrix method. *Optics Letters*, 20, 1934–1936.
- Macke, A. und Mishchenko, M. I., 1996. Applicability of regular particle shapes in light scattering calculations for atmospheric ice particles. *Appl. Opt.*, 35, 4291–4296.
- Macke, A., Mishchenko, M. I., und Cairns, B., 1996a. The influence of inclusions on light scattering by large ice particles. *J. Geophys. Res.*, 101, 23,311–23,316.
- Macke, A., Mitchell, D., und von Bremen, L., 1999. Monte carlo radiative transfer calculations for inhomogeneous mixed phase clouds. *Phys. Chem. Earth (B)*, 24(3), 237–241.
- Macke, A., Müller, J., und Raschke, E., 1996b. Single scattering properties of atmospheric ice crystals. *J. Atmos. Sci.*, 53, 2813–2825.
- Marchuk, G. I., Mikhailov, G. A., Nazareliev, R. D., Darbinjan, R. A., Kargin, B. A., und S., E. B., 1980. *The Monte Carlo Methods in Atmospheric Optics*. Springer-Verlag.
- Marshak, A., A., D., Wiscombe, W., und Cahalan, R., 1995a. Radiative smoothing in fractal clouds. *J. Geophys. Res.*, 100, 26 247–26 261.
- Marshak, A. and Davis, A., Wiscombe, W., und Titov, G., 1995b. The verismilitude of the Independent Pixel Approximation used in cloud remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, 52, 71–78.

- McFarquhar, G., Yang, P., Macke, A., und Baran, J., 2001. A new parameterization of single-scattering radiative properties for tropical ice clouds using observed ice crystal size and shape distributions. *JC*, xx, xx–xx. Eingereicht.
- McFarquhar, G. M., Heymsfield, A. J., Macke, A., Iaquina, J., und Aulenbach, M., 1999. Use of observed ice crystal sizes and shapes to calculate mean-scattering properties and multispectral radiances: CEPEX April 4, 1993, case study. *J. Geophys. Res.*, 104(D24), 31,763–31,779.
- Miloshevich, L., Voemel, H., Paukkunen, A., Heymsfield, A., und Oltmann, S., 2001. Characterization and correction of relative humidity measurements from Vaisala RS80-A radiosondes at cold temperatures. *JAOT*, 18, 135–156.
- Mishchenko, M. I., 1993. Light scattering by size-shape distribution of randomly oriented axially symmetric particles of a size comparable to a wavelength. *Appl. Opt.*, 32, 4652–4666.
- Mishchenko, M. I. und Macke, A., 1999. How big should ice crystals be to produce haloes. *Appl. Opt.*, 38(9), 1626–1629.
- Mishchenko, M. I., Rossow, W., Macke, A., und Lacis, A., 1996. Sensitivity of cirrus cloud albedo, bidirectional reflectance and optical thickness retrieval accuracy to ice particle shape. *J. Geophys. Res.*, 101, 16 973–16 985.
- Mitchell, D. und Macke, A., 1997. A new treatment of cirrus cloud radiative properties. In W. Smith und K. Stamnes, Herausgeber, *IRS'96: Current Problems in Atmospheric Radiation*, Seiten 163–166. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia.
- Mitchell, D., Macke, A., und Liu, Y., 1996. Modelling cirrus clouds. part II: Treatment of radiative properties. *J. Atmos. Sci.*, 53, 2967–2988.
- Oreopoulos, L. und Barker, H., 1999. Accounting for subgrid-scale cloud variability in a multi-layer 1d solar radiative transfer algorithm. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 125, 301–330.
- Ramanathan, V., Cess, R. D., Harrison, E. F., Minnis, P., Barkstrom, B. R., Ahmad, E., und Hartmann, D., 1989. Cloud radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment. *Science*, 243, 57–63.
- Ramanathan, V. und Co-Autoren, 1995. Warm pool heat budget and shortwave cloud forcing. *Science*, 267, 499–503.
- Rossow, W. B., 1993. *Satellite Observations of radiation and clouds to diagnose energy exchanges in the climate: Part I*, Band 5 von *I: Global Environmental Change*, Kapitel 5, Seiten 123–141. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Scheirer, R., 2001. *Solarer Strahlungstransport in der inhomogenen Atmosphäre*. Doktorarbeit, Berichte aus dem Institut für Meereskunde an der Christian-Albrecht-Universität Kiel, Nr. 322.
- Scheirer, R. und Macke, A., 2001a. On the accuracy of the independent column approximation in calculating the downward fluxes in the UV-A, UV-B and PAR spectral ranges. *J. Geophys. Res.*, 106(D13), 14,301–14,312.
- Scheirer, R. und Macke, A., 2001b. On the accuracy of the independent pixel approximation in 3d radiative transfer. In W. L. Smith und Y. M. Timofeyev, Herausgeber, *IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation*, Seiten 229–232. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia.

- Schertzer, D. und Lovejoy, S., 1987. Physically based rain and cloud modeling by anisotropic, multiplicative turbulent cascades. *J. Geophys. Res.*, 92, 9692–9714.
- Schewski, M., 2001. *Einfluss dreidimensionaler Bewölkung auf den breitbandigen solaren Strahlungstransport*. Diplomarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Christian-Albrecht-Universität zu Kiel, Institut für Meereskunde, Kiel.
- Schewski, M., Macke, A., Scheirer, R., und Jung, T., 2001. A statistically based parameterisation of shortwave cloud radiative fluxes for inhomogeneous mixed-phase clouds. In W. L. Smith und Y. M. Timofeyev, Herausgeber, *IRS'2000: Current Problems in Atmospheric Radiation*, Seiten 249–252. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia.
- Schlimme, I. und Macke, A., 2001. Der Einfluss von Kristallform- und Grössenverteilungen auf die solaren Strahlungsfelder von Cirruswolken. In *Meteorologentagung Wien, 18. - 22. 9., 2001*, Nummer 27/Publ. Nr. 399.
- Stackhouse, P. W. J. und Stephens, G. L., 1991. A theoretical and observational study of the radiative properties of cirrus: Results from FIRE 1986. *J. Atmos. Sci.*, 48, 2044–2059.
- Stephens, G. und Tsay, S.-C., 1990. On the cloud absorption anomaly. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 116, 671–704.
- Takano, Y. und Liou, K. N., 1989. Solar radiative transfer in cirrus clouds, part I: Single-scattering and optical properties of hexagonal ice crystals. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3–18.
- Takano, Y. und Liou, K. N., 1995. Radiative transfer in cirrus clouds. Part III: Light scattering by irregular ice crystals. *J. Atmos. Sci.*, 52, 818–837.
- v. Bremen, L., Ruprecht, E., und Macke, A., 2001. Errors in liquid water path retrieval arising from cloud inhomogeneities: The beam-filling effect. *Meteorol. Z.*, xx(xx), xx–xx. Accepted.
- van Lammeren, A., Feijt, A. ad Konings, J., van Meijgaard, E., und van Ulden, A., 2000. Combination of ground-based and satellite cloud observations on a routine basis. *Meteorol. Z.*, 9(2), 125–134.
- Wielgaard, D. J., Mishchenko, M. I., Macke, A., und Carlson, B. E., 1997. Improved T-matrix computations for large, nonabsorbing and weakly absorbing nonspherical particles and comparison with geometric optics approximation. *Appl. Opt.*, 36, 4305–4313.
- Wielicki, B. A., Cess, R. D., King, M. D., Randall, D. A., und Harrison, E. F., 1995. Mission to planet Earth: Role of clouds and radiation in climate. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 76(11), 2125–2153.
- Yang, P. und Liou, K. N., 1995. Light scattering by hexagonal ice crystals: comparison of finite difference time domain and geometric optic models. *J. Opt. Soc. Am. A*, 12, 162–176.
- Zhang, Y., Li, Z., und Macke, A., 2001. Retrieval of surface solar radiation budget under ice cloudy sky: Uncertainty analysis and parameterization. *J. Atmos. Sci.*, xx, xx–xx. Eingereicht.
- Zhang, Y., Macke, A., und Albers, F., 1999. Effect of crystal size spectrum and crystal shape on stratiform cirrus radiative forcing. *Atmos. Research*, 52, 59–75.