

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

Phase II

Numerische Untersuchungen zur Dynamik von Kondensstreifen in Abhängigkeit von Schichtung und Baroklinität der Atmosphäre unter besonderer Berücksichtigung der Strahlungswechselwirkung

im Verbundvorhaben
„Schadstoffe in der Luftfahrt“

Förderkennzeichen 01 LL 9503 - 3

Bewilligungszeitraum
01. 01. 1996 bis 31. 03. 1998

Andreas Chlond, Jörg Schulz, Frank Paul

Max-Planck-Institut für Meteorologie
Bundesstraße 55
D-20146 Hamburg

April 1999

1. Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Auf der Grundlage eines Grobstruktursimulationsmodells (GSM) wurden die Mikrophysik, die Dynamik und die Strahlungseigenschaften von Kondensstreifen untersucht. Die Ergebnisse dieser Modellstudien wurden unter anderem dazu benutzt, die Empfindlichkeit der Kondensstreifeneigenschaften im Hinblick auf externe Umgebungsbedingungen zu evaluieren.

Darüber hinaus wurde versucht, die Ergebnisse des GSM zu validieren. Durch einen Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Eigenschaften von Kondensstreifen sollte Aufschluß darüber erhalten werden, ob die atmosphärischen Zustandsgrößen und die zeitliche Entwicklung von Kondensstreifen durch das Modell richtig wiedergegeben wird.

Schließlich wurde herausgearbeitet, welchen Einfluß die Form der Eispartikel auf die Kondensstreifenentwicklung ausübt. Basierend auf diesen Untersuchungen konnten folgende Resultate und Schlußfolgerungen abgeleitet werden:

1. Das GSM reproduziert die gemessene Entwicklung der Partikelspektren.
2. Die Größe der Eispartikel im Kondensstreifen variiert im Bereich von 5 - 10 μm . Die Größe der Eispartikel im Kondensstreifen ist demnach deutlich kleiner als in natürlichen Cirren.
3. Die optischen Dicken der simulierten Kondensstreifen weisen nach einer Simulationszeit von 50 Minuten Werte im Bereich von 0.3 bis 0.5 auf.
4. Der Wolkenalbedobias im Klimamodell für die hier simulierten Kondensstreifen kann vernachlässigt werden. Erst bei optischen Dicken größer als eins ist ein signifikanter Bias festzustellen.
5. Die berechneten Werte der horizontalen Diffusionskoeffizienten der simulierten Kondensstreifen befinden sich in Übereinstimmung mit experimentellen Befunden.
6. Die Form der Eispartikel übt einen merklichen, jedoch - verglichen mit externen Einflußgrößen (z.B. der relativen Feuchte) - geringen Einfluß auf die Kondensstreifenentwicklung aus.
7. Die entwickelten Strahlungstransportmodelle sind in der Lage das dreidimensionale Strahlungsfeld eines Kondensstreifens monochromatisch und breitbandig zu berechnen.
8. Für die Berechnung von dreidimensionalen Feldern der Strahlungsflußdichte in Atmosphären mit Wolken im solaren Spektralbereich ist eine moderate Winkelauflösung mit 8 zenitalen sowie 16 azimutalen Stützstellen erforderlich.

2. Darstellung der wesentlichen Fortschritte in der Beurteilung der Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Atmosphäre und ein Vergleich mit dem Stand anderer Gruppen

Die Kenntnis der Lebensdauer von Kondensstreifen als Funktion der großräumigen meteorologischen Feldgrößen ist Grundvoraussetzung für die Abschätzung ihrer Klimawirksamkeit. Im Antragszeitraum wurde daher das Grobstruktursimulationsmodell (GSM) mit realistischen prognostischen Variablen und externen Parametern initialisiert und ein Vergleich der simulierten Ergebnisse mit Messungen vorgenommen.

Die wesentlichen Ergebnisse beziehen sich auf die zeitliche Entwicklung eines Kondensstreifen über eine Zeitspanne von etwa 50 Minuten. Zur Initialisierung der prognostischen Variablen (Geschwindigkeits-, Temperaturstörungs- und Konzentrationsfelder) wurden Ergebnisse der Modellrechnungen von GERZ und EHRET (1996) verwendet. Dadurch konnten realistischere Anfangsbedingungen zu Beginn der Dispersionsphase eines Kondensstreifens vorgegeben werden. Bei der Festlegung der externen Parameter Druck, Temperatur, relative Feuchte und statische Stabilität haben wir uns an Messungen des Experiments CONTRAIL vom 2. Mai 1996 orientiert.

Die mit dem GSM durchgeführten Rechnungen verfolgen die Entwicklung der dynamischen, wolkenphysikalischen und strahlungsbedingten Vorgänge im Dispersionsbereich des Kondensstreifens und haben unter anderem folgende Ergebnisse erbracht:

1. Der mittlere effektive Radius nimmt mit der Zeit zu, wobei sich das Wachstum von Nadeln und Platten wie das von Kugeln bei 12% höherer relativer Feuchte verhält. Die simulierten Werte des effektiven Radius variieren nach einer Simulationszeit von 50 Minuten in einem Bereich von 5 - 10 μm . Die Größe der Eispartikel im Kondensstreifen ist demnach deutlich kleiner als in natürlichen Cirruswolken.
2. Die zeitliche Entwicklung des Eisgehaltes verläuft ähnlich wie beim effektiven Radius. Die totale Eismasse der simulierten Kondensstreifen variiert nach einer Simulationszeit von 50 Minuten in den Modellrechnungen von 0.5 bis 2.0 kg m^{-1} . Dieser Wert ist deutlich größer als die vom Flugzeug emittierte Wassermenge (etwa 15 g m^{-1}). Die durch die Kerosinverbrennung erzeugte Wassermenge stößt demnach die Kondensstreifenbildung nur an, der Hauptteil der Eismasse im Kondensstreifen wird durch Phasenumwandlung der in der Umgebungsluft enthaltenen Feuchte produziert.
3. Der Mittelwert der optischen Dicke nimmt in allen Modellrechnungen in den ersten 10 Minuten rasch ab, und bleibt danach in etwa konstant. Die optischen Dicken der simulierten Kondensstreifen weisen nach einer Simulationszeit von etwa 50 Minuten Werte im Bereich von 0.3 - 0.5 auf. Diese Werte befinden sich im Einklang mit aus Messungen abgeleiteten Werten der optische Dicke für Kondensstreifen im Dispersionsregime (JÄGER et al., 1997).
4. Die Rechnungen zum solaren Albedobias zeigen, daß für die in den GSM Simulationen gefundenen optischen Dicken der horizontale Strahlungstransport vernachlässigt werden kann. Der Unterschied zwischen der Independent Pixel Approximation und einer planpar-

allelen Rechnung für horizontal gemittelte mikrophysikalische Eigenschaften des Kondensstreifens gewinnt ebenfalls erst bei optischen Dicken größer als eins an Bedeutung.

5. Bei der zeitlichen Entwicklung der Kondensstreifenbreite gibt es eine starke Ähnlichkeit zwischen der Simulation mit kugelförmigen Eispartikeln bei 78% relativer Feuchte und den Rechnungen mit Nadeln und Platten als Eispartikeln (bei 78% Feuchte). Bei geringerer (66%) bzw. höherer (90%) relativer Feuchte (und kugelförmigen Eisteilchen) stellt man eine kleinere bzw. größere horizontale Ausbreitungsrate fest. Die aus der zeitlichen Änderung des Quadrates der horizontalen Halbwertsbreite abgeleiteten horizontalen Diffusionskoeffizienten liegen im Bereich von 12 bis 26 m² s⁻¹. Diese Werte befinden sich in guter Übereinstimmung mit experimentellen Befunden.
6. Eine Sensitivitätsstudie bezüglich der Parameter relative Feuchte und Partikelform erbrachte eine stärkere Abhängigkeit verschiedener wolkenmikrophysikalischer Parameter von der relativen Feuchte der Umgebung als von der Partikelform. Insbesondere die horizontale Ausbreitung des Kondensstreifens wird nach etwa 10 Minuten erheblich stärker von der vorgegebenen relativen Feuchte beeinflusst.
7. Der qualitative Vergleich der simulierten Partikelspektren mit den aus Messungen gewonnenen Daten zeigt eine gute Übereinstimmung. Sowohl der Radius beim Maximum der Partikelkonzentration als auch die Form der Kurve und die maximale Teilchenkonzentration stimmen mit den aus Messungen in verschiedenen alten Kondensstreifen gewonnenen Daten annähernd überein.
8. Eine Sensitivitätsstudie mit dem Strahlungsmodell bezüglich der Vereinfachung der Phasenfunktion auf rechtwinkelige Streuung (Vierstromapproximation in 2D) erbrachte, daß dies im solaren Spektralbereich zu relativen Fehlern von 1 - 4% in der reflektierten Strahlungsflußdichte und 2 - 5% in der transmittierten Strahlungsflußdichte führt. Dabei bezieht sich die erste Angabe jeweils auf senkrechten Sonnenstand und die zweite auf einen Sonnenzenitwinkel von 75°. Daraus ergibt sich, daß für die genaue Berechnung von zwei- oder dreidimensionalen Feldern der Strahlungsflußdichte eine moderate Winkelauflösung mit 8 zenitalen und 16 azimutalen Stützstellen nötig ist.

Außerhalb dieses Forschungsvorhabens wurden von anderen Gruppen weitere Prozeßstudien durchgeführt, die sich aber auf andere Fragestellungen beziehen (DÜRBECK, 1997) bzw. einen anderen Zeitabschnitt im Entwicklungszyklus eines Kondensstreifens untersuchten. Zu nennen ist hier vor allem die Arbeit von GERZ und EHRET (1996), welche die Entwicklung eines Kondensstreifens während der Jet- und Vortexphase zum Gegenstand hatte. Die Modelldaten aus dieser Arbeit zum Ende des Vortexregimes (nach 150 Sekunden) konnte in dieser Studie zur Initialisierung der prognostischen Variablen verwendet werden.

Andere Arbeiten zur Bestimmung klimarelevanter Eigenschaften von Kondensstreifen sind mit Hilfe von Satellitendaten, LIDAR und in-situ Messungen durchgeführt worden (BAKAN et al., 1994; WENDLING et al., 1997; JÄGER et al., 1997 und GAYET et al., 1996). Als Ergebnis dieser Untersuchungen zeigt sich, daß Kondensstreifen regional und zeitweilig zu ausgeprägten Bedeckungsgraden beitragen. Sie können Ausdehnungen von einigen Kilometern in der Breite und mehreren hundert Kilometern in der Länge aufweisen.

In-situ Messungen des Größenspektrums von Eispartikeln ergaben innerhalb von Kondensstreifen systematisch höhere Teilchenzahldichten als in natürlichen Cirren, aber noch innerhalb

deren Variabilität. Die Satellitendaten lassen erkennen, daß der Luftverkehr für eine Zunahme der Bewölkung um 0.4% über Mitteleuropa verantwortlich ist. Der modellmäßig aus dieser Zunahme des Bedeckungsgrades ableitbare Beitrag zum Treibhauseffekt ist mit 0.05 K allerdings so gering, daß er meßtechnisch nicht nachweisbar ist. Eine mit einem globalen Klimamodell durchgeführte Studie zur klimatischen Wirkung von Kondensstreifen deutet daraufhin, daß es einer Zunahme von mindestens 5 Prozentpunkten im Bereich der Hauptflugrouten bedarf, damit sich eine signifikante Klimaantwort im Modell abzeichnet (PONATER et al., 1996).

3. Einleitung zum Forschungsvorhaben

3.1 Aufgabenstellung

Ziel der Untersuchungen war zum einen, das in der ersten Phase des Projektes entwickelte GSM gezielt anzuwenden und die Anfangsbedingungen und externen Parameter möglichst realitätsnah vorzugeben. Hierzu wurden Flugzeugmessungen des vom Verbundprogramm durchgeführten Experiments CONTRAIL verwendet. Zur Initialisierung der prognostischen Variablen des Modells wurden Modelldaten von GERZ und EHRET (1996) verwendet. Diese Daten sind das Ergebnis von Simulationsrechnungen, die den dynamischen und thermodynamischen Zustand der flugzeuginduzierten Turbulenzstrukturen am Ende des Vortexregimes realitätsnah wiedergeben.

Weiterhin sollten Vergleiche zwischen simulierten und gemessenen Eigenschaften von Kondensstreifen dazu dienen, die Ergebnisse des Grobstrukturmodells zu validieren. Dieser Vergleich soll Aufschluß darüber geben, ob die atmosphärischen Zustandsgrößen und die zeitliche Entwicklung von Kondensstreifen durch das Modell richtig wiedergegeben werden.

Darüberhinaus wurden Sensitivitätsstudien mit veränderten externen (relative Feuchte) und internen (Teilchenform) Parametern durchgeführt. Um den Einfluß der Partikelform auf die Kondensstreifenentwicklung zu untersuchen, wurde die Abweichung der Eisteilchen von der Kugelform durch Einbeziehung von Korrekturfaktoren bei der mikrophysikalischen Modellierung berücksichtigt.

Ein weiteres Ziel der Untersuchungen war, mit Hilfe des in Phase I entwickelten Strahlungstransportmodells Erkenntnisse über die effektiven Strahlungseigenschaften der in Phase I simulierten Kondensstreifen zu sammeln, die bei Simulationen mit einem globalen Zirkulationsmodell berücksichtigt werden können. Im Vordergrund steht dabei die Quantifizierung des Albedobias im Klimamodell, der durch vergleichende Rechnungen für homogene und inhomogene Verhältnisse abgeschätzt werden sollte.

Zusätzlich wurde eine Sensitivitätsstudie zur Brauchbarkeit einer Vierstromapproximation durchgeführt, die Aufschluß darüber geben sollte, ob die Phasenfunktion stark vereinfacht werden kann, was die Laufzeit eines Strahlungsmodells stark verkürzen würde.

3.2 Hintergrund

Den luftverkehrsbedingten Wasserdampfemissionen kommt eine vielfältige Wirkung zu. Sie begünstigen über Eispartikelbildung die Zunahme dünner Cirrusbewölkung und beeinflussen damit den Energiehaushalt der Erde. Wegen der niedrigen Temperaturen an der Tropopause tragen diese optisch dünnen Eiswolken zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei. Der Grund hier-

für ist ihr hohes Emissionsvermögen im langwelligen Spektralbereich bei gleichzeitig hoher Transmission im solaren Spektralbereich (GRASSL, 1990; LIOU et al., 1990). Weiterhin verändern die Emissionen die Luftchemie und verursachen möglicherweise heterogene chemische Prozesse an den sich bildenden Eispartikeln. Vor dem Hintergrund eines ständigen Wachstums des Weltluftverkehrs ist die Vorhersage des Lebenszyklus und des Ausbreitungsverhaltens von Kondensstreifen zur Bewertung seines Gefährdungspotentials von großer Bedeutung.

3.3 Stand des Wissens

Vor dem Hintergrund einer globalen Klimaänderung sind die Bemühungen zum Verständnis der Klimawirksamkeit von Kondensstreifen in den letzten Jahren erheblich ausgeweitet worden. Das Wissen um die beteiligten physikalischen und chemischen Prozesse konnte auch durch die im Verbundprogramm durchgeführten Forschungsprogramme erheblich erweitert werden (SCHUMANN et al., 1997). Der Luftverkehr hat zwar nur einen geringen Anteil an den anthropogenen Emissionen, jedoch verzeichnet er die höchsten Zuwachsraten und die Emissionen finden in einer klimatisch sehr sensiblen Zone statt.

In den Hauptflugkorridoren in 8 - 12 km Höhe ist die Lebensdauer der emittierten Partikel und Gase vergleichsweise hoch und die Temperaturen sehr niedrig. Ersteres begünstigt heterogene chemische Reaktionen, letzteres trägt über die Eispartikelbildung zu einer Zunahme der Cirrusbewölkung bei. Diese wiederum verstärkt durch ihr hohes Emissionsvermögen im langwelligen Spektralbereich (und hoher Transmission im solaren) den anthropogenen Beitrag zum Treibhauseffekt (GRASSL, 1990; LIOU et al., 1990).

Die Entstehungsbedingungen von Kondensstreifen in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte der Umgebung sind vielfach untersucht und gut verstanden (APPLEMAN, 1953; SCHUMANN, 1996). Während die meisten der im unmittelbaren Nachlauf der Flugzeuge entstehenden Kondensstreifen nur für sehr kurze Zeit sichtbar bleiben, sind die Bedingungen für die gelegentlich sehr langlebigen Kondensstreifen weniger gut untersucht. Wegen der damit verbundenen Erhöhung des natürlichen Bedeckungsgrades sind sie aber von besonderer Bedeutung für den vermuteten Einfluß auf den Treibhauseffekt der durch optisch dünne Wolken vermehrt werden sollte (FORTUIN et al., 1995).

Langlebige Kondensstreifen sind für einige Zeit gut in Satellitenbildern als gerade Linien sichtbar. Nach einiger Zeit verformen sie sich und sind dann nicht mehr von natürlichen Cirren zu unterscheiden. Aufgrund von Satellitendaten hat man den Bedeckungsgrad durch die langlebigen Kondensstreifen, soweit sie sich von natürlichen Cirren unterscheiden lassen, auf ca. 0.4% im Jahresmittel über Mitteleuropa und ca. 1% über dem östlichen Nordatlantik abgeschätzt (BAKAN et al., 1994). Weltweit wird mit einem Bedeckungsgrad von ca. 0.1% gerechnet (SAUSEN et al. 1998). Der Flächenanteil von Cirruswolken, die aus Kondensstreifen entstanden sind, sich aber nicht mehr von Cirren unterscheiden, ist unbekannt. Neuere Arbeiten haben gezeigt, daß etwa 15% der Atmosphäre in der oberen Troposphäre feucht genug sind, um langlebige Kondensstreifen zu bilden (SAUSEN et al., 1998). Insofern sollten 15% einen oberen Grenzwert für den möglichen Wolkenbedeckungsgrad infolge des Luftverkehrs darstellen.

Während GCM-Experimente (Global Circulation Model) zeigen, daß die Wasserdampfemissionen durch den Flugverkehr als solche im Strahlungshaushalt zu vernachlässigen sind (RIND et al. 1996), ist ein merkliches (Sommer-) Signal von Kondensstreifen nicht auszuschließen (PONATER et al., 1996). Allerdings deutet die Studie daraufhin, daß es einer Zunahme von

mindestens 5 Prozentpunkten im Bereich der Hauptflugrouten bedarf, damit sich eine Klimaantwort abzeichnet. Diese Rechnungen sind nur als Abschätzung der Effekte zu betrachten. Nach dem Stand des Wissens kann man aber nicht ausschließen, daß Kondensstreifen bei weiter zunehmendem Luftverkehr das Klima merklich beeinflussen.

Die dynamischen, wolkenphysikalischen und strahlungsbedingten Vorgänge im Dispersionsbereich des Kondensstreifens waren bisher nur wenig untersucht worden. Zu diesem Problemkreis lagen nur wenige Prozeßstudien vor, die sich auf Ergebnisse zweidimensionaler Simulationen stützen konnte (BOIN und LEVKOV, 1994; GIERENS, 1996). In diesen Studien wurden allerdings die wolkenphysikalischen Vorgänge und die Effekte strahlungsbedingter Nichtgleichgewichtsprozesse nur durch sehr einfache Ansätze berücksichtigt.

3.4 Wesentliche Ergebnisse der Phase I

Grobstruktursimulationen des Strömungsfeldes wurden in einer Atmosphäre mit Eiswolken mit einer Modellversion durchgeführt, die ein einfaches, auf der Zweistromapproximation beruhendes Strahlungsschema verwendet. Der Modelleinsatz erfolgte in der sogenannten Dispersionsphase im Lebenszyklus eines Kondensstreifens, d.h. in demjenigen Zeitabschnitt, in dem die vom Flugzeug induzierte Turbulenz weitgehend abgeklungen ist und demnach die Turbulenzstruktur im Kondensstreifen im wesentlichen durch die atmosphärische Hintergrundturbulenz und durch die Eigendynamik der Eiswolke bestimmt wird.

Zur Initialisierung des Modells wurde ein barokliner, geschichteter atmosphärischer Grundzustand angenommen, der dadurch verändert wurde, daß die infolge der Kerosinverbrennung freigesetzte Wasserdampfmenge auf eine quadratische Querschnittsfläche von 900 m² verteilt wurde und dort zu einer Erhöhung des Gesamtwassergehaltes beitrug. Da die Wirbelschleppes des Flugzeuges bereits dissipiert sein soll, wurde zu Beginn der Rechnungen ein horizontal homogenes, vertikal geschertes Strömungsfeld vorausgesetzt, dem eine zufällige Temperaturstörung kleiner Amplitude überlagert wurde.

Die mit dem GSM durchgeführten Rechnungen, die die zeitliche Entwicklung des Kondensstreifens über eine Zeitspanne von 30 Minuten verfolgen, haben unter anderem folgende Ergebnisse erbracht:

1. Langlebige, d.h. sich infolge der Eigendynamik ausbreitende Kondensstreifen, können sich nur in einer in bezug auf die Eisphase übersättigten Atmosphäre ausbilden. In diesen Fällen weist das Turbulenzfeld bereits zu Beginn der Dispersionsphase eine komplexe Struktur auf, dessen Kenngrößen sich deutlich von denen in der Umgebung unterscheiden. Die sich in der Eiswolke ausbildende Sekundärströmung weist eine Amplitude von etwa 0.1 m/s auf.
2. Die sich im Kondensstreifen entwickelnden Wirbel werden im wesentlichen durch die durch Auftrieb produzierte kinetische Energie gespeist. Dabei spielt die durch Phasenumwandlung freigesetzte latente Wärme die entscheidende Rolle. Die durch differentielle Strahlungserwärmung hervorgerufene kinetische Energieproduktion übt hingegen wegen der geringen optischen Dicke der Kondensstreifen nur einen geringen Einfluß aus.
3. Die mit dem Modell durchgeführte Parameterstudie zeigt, daß neben der relativen Feuchte und der Temperatur der umgebenden Atmosphäre die Dichteschichtung des Mediums die entscheidende Einflußgröße darstellt, die das Ausbreitungsverhalten des Kondensstreifens

maßgeblich bestimmt. Die Baroklinität der Atmosphäre und damit die Scherung des Grundstromprofils ist nur von untergeordneter Bedeutung, da sie die Geschwindigkeit der geometrischen Querschnittsänderung des Kondensstreifens nur geringfügig modifiziert.

4. Strahlungsbedingte Nichtgleichgewichtszustände spielen wegen der geringen Größe der Eispartikel (mittlere Teilchengröße nach 30 Minuten Simulationszeit $< 50 \mu\text{m}$) nur eine untergeordnete Rolle.

3.5 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Antrag wurden zwei Ziele formuliert. Ziel (1) umfaßt den Versuch, die Ergebnisse des Grobstruktursimulationsmodells (GSM) zu validieren. Durch einen Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Eigenschaften von Kondensstreifen soll Aufschluß darüber erhalten werden, ob die atmosphärischen Zustandsgrößen und die zeitliche Entwicklung von Kondensstreifen durch das Modell richtig wiedergegeben wird.

Der Arbeitsplan zur Erreichung der Aufgabenstellung (1) umfaßte die folgenden Maßnahmen:

1. Dynamische Initialisierung der prognostischen Variablen im GSM. Hierzu werden die Modelldaten eines Wirbels im Nachlaufbereich eines Flugzeuges zu Beginn des Dispersionsregimes (nach 150 Sekunden) nach Simulationsrechnungen von GERZ und EHRET (1996) verwendet.
2. Festlegung der großräumigen meteorologischen Umgebungsbedingungen nach Messungen, die während der Kampagne CONTRAIL gewonnen wurden. Hierzu werden die während eines Meßfluges vom 2. Mai 1996 ermittelten Daten Druck, Temperatur, relative Feuchte und statische Stabilität verwendet.
3. Durchführung einer Sensitivitätsstudie zum Einfluß der relativen Feuchte und der Partikelform auf die Entwicklung des Kondensstreifens. In einem Referenzlauf des GSM werden kugelförmige Teilchen und eine relative Feuchte (bezüglich Wasser) von 78% angenommen. Die relative Feuchte wird in zwei weiteren Modellläufen mit 66% und 90% initialisiert (bei Kugelförmigen Partikeln). Die Abweichung der Eispartikel von der Kugelform wird in zwei weiteren Modellläufen mit kurzen Nadeln und dicken Platten mit einem Aspektverhältnis von 0.5 realisiert. Die relative Feuchte (über Wasser) wird wie im Referenzlauf zu 78% spezifiziert.
4. Validierung der Ergebnisse des GSM durch Vergleich mit Messungen. Hierzu wird ein qualitativer Vergleich mit Partikelspektren durchgeführt, die in verschiedenen alten Kondensstreifen und während unterschiedlicher Kampagnen gemessen wurden.

Ziel 2 verfolgt den Ansatz die in Phase I entwickelten Methoden und Modelle anzuwenden, um Erkenntnisse über die effektiven Strahlungseigenschaften von Kondensstreifen zu erzielen, die bei Simulationen mit einem globalen Zirkulationsmodell berücksichtigt werden können. Der Arbeitsplan für diesen Teil umfaßte folgende Punkte:

1. Um für die in CHLOND (1998) beschriebenen Kondensstreifenexperimente Strahlungstransportrechnungen durchführen zu können, werden die zur Verfügung stehenden Modelle hinsichtlich der Parameterisierung optischer Eigenschaften und der Absorption durch Gase erweitert.

2. Untersuchung des Effektes den eine starke Vereinfachung der Phasenfunktion im solaren Spektralbereich auf die Ergebnisse einer dreidimensionalen Strahlungstransportrechnung haben kann. Hierzu werden Ergebnisse eines vollen dreidimensionalen Strahlungsmodells mit denen eines Modells verglichen, bei dem die Phasenfunktion auf rechtwinkelige Streuung beschränkt ist (Vierstromapproximation).
3. Durch vergleichende Rechnungen zwischen dreidimensionalen, spaltenweise planparallelen und planparallelen Rechnungen für horizontal homogene Verhältnisse, wie sie im Klimamodell anzutreffen sind, soll ein Beitrag zur Parameterisierung der optischen Dicke im Klimamodell geleistet werden. Im Vordergrund steht dabei die Betrachtung des Albedobias, also die Größe der Überschätzung der Wolkenalbedo im Klimamodell.

4. Arbeiten im Berichtszeitraum

4.1 Modellierung von Kondensstreifen mit dem Grobstruktursimulationsmodell (GSM)

Die Validierung des Grobstruktursimulationsmodells (GSM) hinsichtlich der Parameter

- zeitliche Änderung der Querschnittsfläche des Kondensstreifens,
- 2. relative Feuchte und Temperatur in der Umgebung und innerhalb des Kondensstreifens,
- 3. Größenverteilung und Form der Eispartikel in gealterten Kondensstreifen,
- 4. Kenngrößen des Turbulenzfeldes, und
- 5. integrale Strahlungseigenschaften

ist abgeschlossen worden. Die zum Vergleich erforderlichen Meßdaten wurden im April / Mai 1996 bei der Meßkampagne CONTRAIL der DLR gewonnen.

Auf der Modellseite liegen aus dem Teilprojekt 221 (Bestimmung der dreidimensionalen Ausbreitung von Flugzeugabgasen im Mikro- und Mesoskalenbereich durch Simulation und Messung) verschiedene Simulationsergebnisse zum Ende des Vortexregimes eines Kondensstreifen bereit (GERZ und EHRET, 1996). Zusammen mit den während CONTRAIL gemessenen externen Parametern Druck, Temperatur und relative Feuchte, die die großräumigen meteorologischen Umgebungsbedingungen charakterisieren, wurden diese Modellergebnisse als realistische Anfangsbedingungen für einen neuen Modellauf im Dispersionsbereich genutzt.

Für die Evaluierung der Ergebnisse des GSM wurden Messungen von WENDLING et al. (1997) verwendet. Da eine Reihe von Messungen der Partikelspektren vorlagen, wurde diese Größe gewählt, um einen qualitativen Vergleich der modellierten und gemessenen Spektren durchzuführen. Der Vergleich zwischen diesen Spektren ist bedeutsam, da zur Abschätzung der Klimawirksamkeit von Kondensstreifen die genaue Vorhersage seiner spektralen mikrophysikalischen Eigenschaften von grundlegender Bedeutung ist.

4.1.1 Initialisierung der neuen Simulationen

Das verwendete GSM wurde bisher für die Untersuchung des Einflusses verschiedener externer Parameter und physikalischer Prozesse im Dispersionsregime eines Kondensstreifen verwendet. Berechnet wurde die Entwicklung eines Kondensstreifen in einem äquidistanten dreidimensionalen Gitter mit je 64 Gitterpunkten in je 10 m Abstand. Im Zentrum der Modellbox wurde ein Kondensstreifen, bestehend aus zwei parallelen Wolkenbändern mit einem horizontalen Abstand von 50 m und 30 m Durchmesser angenommen. Um konvektive

Bewegungen auszulösen, wurde eine zufällige Temperaturstörung kleiner Amplitude überlagert.

Aus numerischen Gründen wurde die Eispartikelverteilung in 12 Klassen mit äquidistantem Abstand auf einer logarithmischen Skala im Radienbereich von $r_{\min} = 1 \mu\text{m}$ bis $r_{\max} = 64 \mu\text{m}$ eingeteilt. Bei der Initialisierung wurde innerhalb des Kondensstreifens ein monodisperses Eispartikelspektrum angenommen, d.h. die initiale Eismasse befand sich in Klasse 4 mit $r_{\text{eff}} = 2.4 \mu\text{m}$. Vorgeschrieben wurde ferner der langwellige Strahlungsfluß am Ober- bzw. Unterrand des Modellgebiets von 30 Wm^{-2} bzw. 250 Wm^{-2} und eine ruhende Atmosphäre ohne vertikale Windscherung.

Die Werte für Druck und Temperatur entsprachen $P_0 = 250 \text{ hPa}$ (entsprechend einer Höhe von etwa 10550 m) und $T_0 = 220 \text{ K}$. Weiterhin wurde ein horizontal homogenes Feld der potentiellen Temperatur θ mit schwach stabiler Schichtung angenommen ($d\theta/dz = 2.5 \text{ K km}^{-1}$) und eine bezüglich Wasser untersättigte aber bezüglich Eis übersättigte Atmosphäre ($r_w = 78\%$, $r_i = 129\%$). Die Parameter dieser Simulation (Variante A) sind zum Vergleich mit den Parametern der im folgenden diskutierten Simulationen (Variante B und C) in Tabelle 1 mit angegeben.

Parameter	Variante A	Variante B	Variante C
Modelltyp	3 D	3 D	2 D
Gitterpunkte	$64 \times 64 \times 64$	$96 \times 32 \times 96$	96×96
Maschenweite	$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10 \text{ m}$	$\Delta x = \Delta z = 10 \text{ m}$, $\Delta y = 12.8 \text{ m}$	$\Delta x = \Delta z = 10 \text{ m}$
Referenzdruck	250.0 hPa	215.9 hPa	288.4 hPa
Referenztemperatur	220.0 K	215.9 K	220.1 K
Pot. Temp. Gradient	0.0025 K m^{-1}	$0.0066352 \text{ K m}^{-1}$	0.00811 K m^{-1}
Feuchte über Wasser	78%	78%	78%
Größenbereich	1.0 - 64 μm	1.0 - 64 μm	0.5 - 32 μm
Anzahldichte der Eispartikelchen zu Beginn	$> 1000 \text{ cm}^{-3}$	$> 1000 \text{ cm}^{-3}$	100 cm^{-3}
Initialisierung	Überlagerung einer zufälligen Temperaturstörung	dynamisch initialisierte Felder von u, v, w, q, c - gemäß Gerz und Ehret	dynamisch initialisierte Felder von u, v, w, q, c - gemäß Gerz und Ehret

Tabelle 1: Übersicht über die in den drei Modellvarianten verwendeten Parameter.

Zur Simulation von Kondensstreifen in der 2. Phase der Projektlaufzeit wurde ebenfalls das in CHLOND (1998) beschriebene GSM verwendet, wobei jedoch nun eine realitätsnahe Initialisierung der prognostischen Variablen angewendet wurde. Diese Modifikation erschien erforderlich, da während des Dispersionsregimes die flugzeuginduzierte Turbulenz im Nachlauf noch aktiv ist. Um diese realistisch zu beschreiben, schließen die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Simulationen an numerische Untersuchungen von GERZ und EHRET (1996) an, die die Dynamik und Abgasvermischung im Nachlauf eines Flugzeuges untersuchten. Für ihren Studien wählten sie einen operationellen Flugzeugtyp und atmosphärische Bedingungen, die typisch für den nordatlantischen Flugverkehr sind.

Betrachtet wurde eine Boeing 747 mit einem Gewicht von $2.5 \cdot 10^6$ N und einer Geschwindigkeit von 247 m/s in einer Höhe von 11.3 km. Der atmosphärische Druck beträgt 215.9 hPa, die potentielle Temperatur 332.1 K und die Brunt-Väisälä-Frequenz 0.014 s^{-1} . Die externen Parameter Druck, Temperatur und statische Stabilität aus dieser Studie wurden für die Variante B der Simulation übernommen (siehe Tabelle 1). Verglichen mit den großräumigen Parametern der Variante A, entsprechen diese Umgebungsbedingungen einer Atmosphäre, die eine stabilere Schichtung, eine niedrigere Temperatur und geringeren Druck aufweist.

GERZ und EHRET stellten ihre Berechnungen der Geschwindigkeits-, Temperaturstörungs- und Konzentrationsfelder (u, v, w, t, c) zum Zeitpunkt $t = 150 \text{ s}$ den Autoren dieses Berichts zur Verfügung. Die flugzeuginduzierte Turbulenz und der Zustand der Abgaswolke zu Beginn des Dispersionsregimes werden hiermit bestmöglich beschreiben. Die Daten dienen als Anfangsbedingungen für die neue Grobstruktursimulation. Zur Festlegung der geometrischen Eigenschaften des Kondensstreifens wurde das passive Konzentrationsfeld verwendet. Dabei wurde unterstellt, daß zum Zeitpunkt $t = 150 \text{ s}$ Eispartikel in einem Bereich angetroffen werden, wo die Konzentration $c > 5 \cdot 10^{-5}$ ist (Abb. 1).

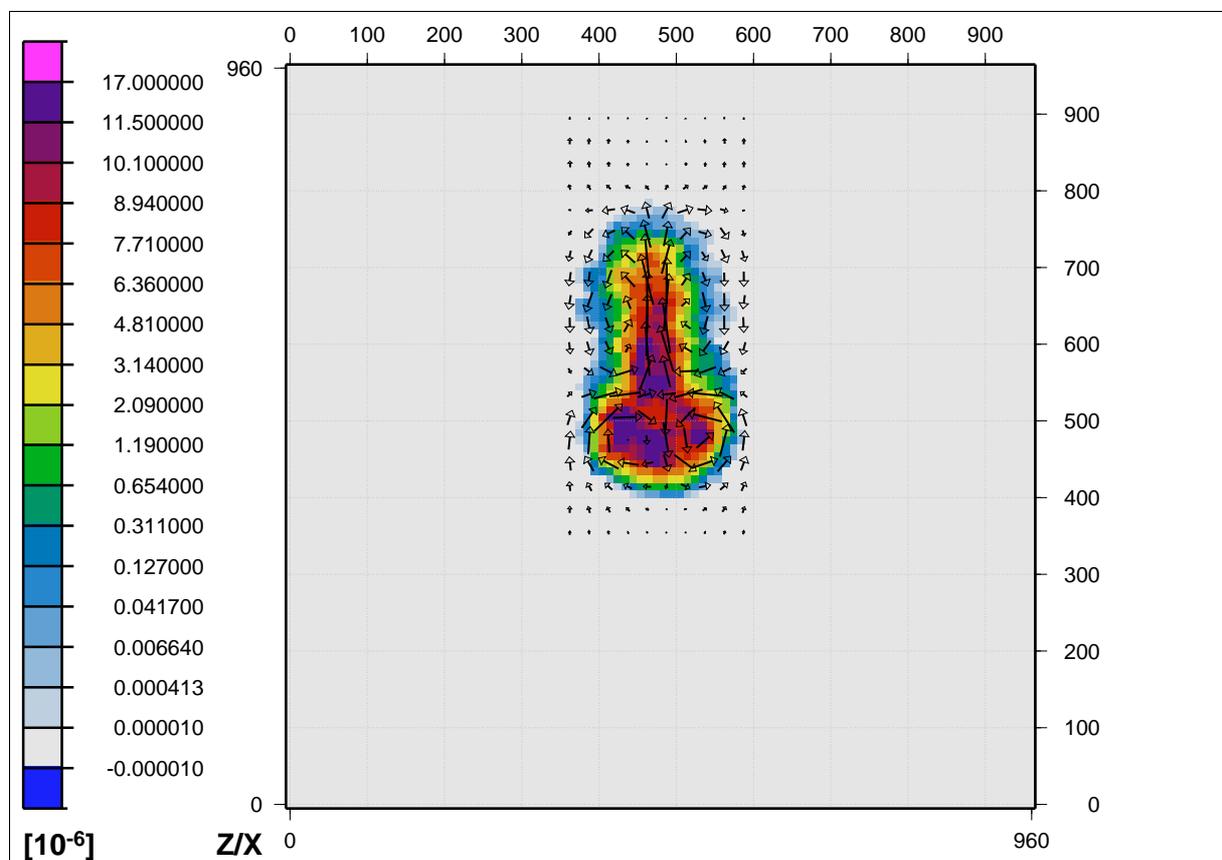


Abb.1: Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilung (entlang y integriert) eines passiven Tracers des Nachlaufwirbels. Als Schwellwert für den sichtbaren Kondensstreifen wurde eine Konzentration von $c > 5 \cdot 10^{-5}$ festgesetzt (nach Gerz und Ehret, 1996).

Für das Gebiet innerhalb des Kondensstreifens wurde angenommen, daß die Phasenrelaxation bereits abgeschlossen ist, so daß hier zur Berechnung der spezifischen Feuchte $r_i^{(Kds.)} = 100\%$ angesetzt werden kann. Der initiale Eisgehalt des Kondensstreifens wurde einerseits durch die Wassermenge bestimmt, die infolge der Kerosinverbrennung vom Flugzeug freigesetzt wird und zum anderen durch die Wasserdampfmenge der Umgebungsluft, die infolge des Einmi-

schens in den Kondensstreifen und nachfolgender Sublimation während der Jet- und Vortexphase in Eis umgewandelt wird. Die gesamte Eismasse wurde in jeder Gitterzelle des Kondensstreifens innerhalb einer Größenklasse des Spektrums konzentriert. Dabei wurde ein mittlerer effektiver Radius von $r_{\text{eff}} = 2.4 \mu\text{m}$ unterstellt, so daß sich eine Teilchenkonzentration von größer als 1000 cm^{-3} ergibt.

Zur Anpassung an die stärkere Dynamik bei der Entwicklung des Kondensstreifens wurde das Modellgebiet in x- und z-Richtung vergrößert. Bei einer Maschenweite von je 10 m in x- und z-Richtung und 12.8 m in y-Richtung umfaßt das Integrationsgitter jetzt $96 \times 32 \times 96$ Gitterpunkte. Das entspricht einem Modellgebiet mit einer Größe von $960 \times 410 \times 960 \text{ m}^3$.

Allerdings benötigt eine 3D Simulation in der Variante B über eine Entwicklungsdauer des Kondensstreifens von 64 Minuten auf einer Cray C916 knapp 23 Stunden CPU Zeit. Bei mittlerer Auslastung der Maschine entspricht dies einer „Turn-Around“ Zeit von etwa zwei Wochen. Aus diesem Grund, wurden die weiteren Simulationen mit Variante C nur zweidimensional gerechnet. Diese Vorgehensweise erscheint berechtigt, da ein Vergleich von 2- und 3-dimensionalen Ergebnissen zeigt, daß die Entwicklung des Eisgehalts des Kondensstreifens in der Ebene senkrecht zur Flugrichtung auch realistisch in zwei Dimensionen wiedergegeben werden kann.

Zur Festlegung der externen Parameter (Temperatur, Druck, relative Feuchte und statische Stabilität der Umgebung) der Modellläufe der Variante C haben wir uns an Messungen orientiert, die während des CONTRAIL Experiments (vergl. Abschnitt 2.1.2) gewonnen wurden. Die Geschwindigkeitsfelder und das Feld der Temperaturstörung wurde wie bei Variante B mit den gerechneten Feldern von GERZ und EHRET (1996) initialisiert. Innerhalb der Querschnittsfläche des Kondensstreifens von anfänglich 25000 m^2 betrug die Teilchenkonzentration bei $t = 0 \text{ s}$ genau 100 cm^{-3} . Dabei wurde ein monodisperses Spektrum mit $r_{\text{eff}} = 0.7 \mu\text{m}$ unterstellt. Der Strahlungsantrieb wurde wie bei Variante A vorgeschrieben.

4.1.2 Das CONTRAIL Experiment

Um den Klimaeffekt von Kondensstreifen mit Hilfe von Klimamodellen abschätzen zu können, ist die Kenntnis der makroskopisch relevanten Strahlungsgrößen - wie Albedo, Emissions- und Transmissionsgrad - von Kondensstreifen Voraussetzung. Diese Größen werden von den mikrophysikalischen Eigenschaften - wie insbesondere Partikelkonzentration, Partikelform und -Größenverteilung - bestimmt. Die im folgenden vorgestellten Messungen wurden während der ebenfalls im Verbundprogramm durchgeführten Kampagne CONTRAIL gewonnen.

In Abb. 2 sind ausgewählte Parameter dargestellt, die während des Meßfluges vom 2. Mai 1996 aufgenommen wurden. Zur Festlegung der externen Parameter Druck, Temperatur, relative Feuchte und statische Stabilität für den Referenzmodelllauf (Variante C), wurde der 3. Flug in den Kondensstreifen im Zeitraum zwischen 31930 und 32670 Sekunden ausgewertet. Der Bereich dieses Zeitfensters ist in der Abbildung mit einem schwarzen Balken und zwei dünnen Strichen markiert. Die verwendeten Mittelwerte wurden direkt aus den Meßkurven der entsprechenden Parameter abgeleitet, die statische Stabilität der Atmosphäre (Änderung der potentiellen Temperatur mit der Höhe) wurde direkt aus den Daten des zum Meßflug gehörigen Steigflugabschnittes abgeleitet.

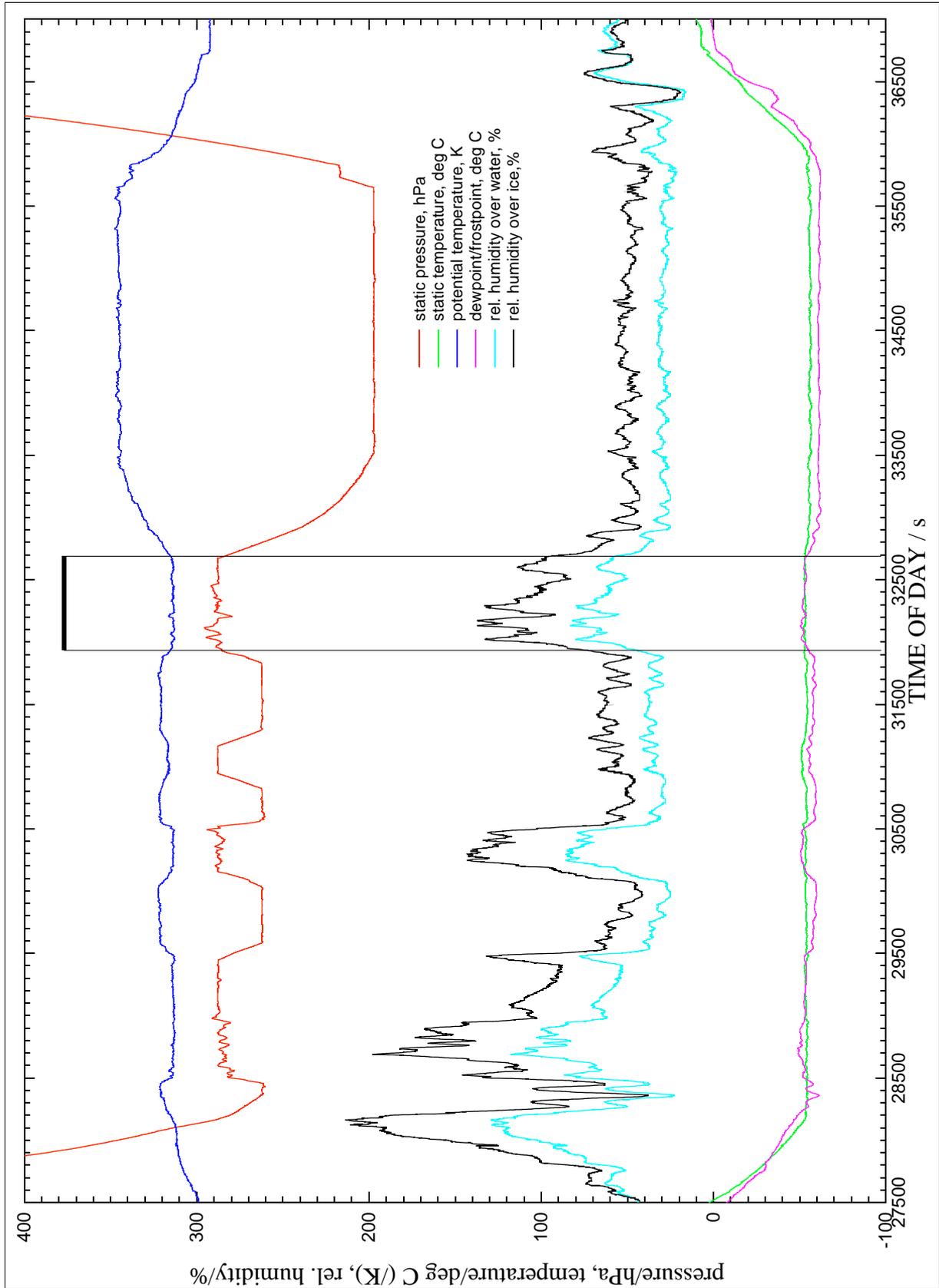


Abb.2: Darstellung einiger während des Meßfluges vom 2. Mai 1996 aufgenommenen Parameter im Zeitraum 27500 bis 37000 Sekunden. Der markierte Bereich wurden zur Ableitung der externen Parameter Druck, Temperatur, relative Feuchte und statische Stabilität ausgewählt.

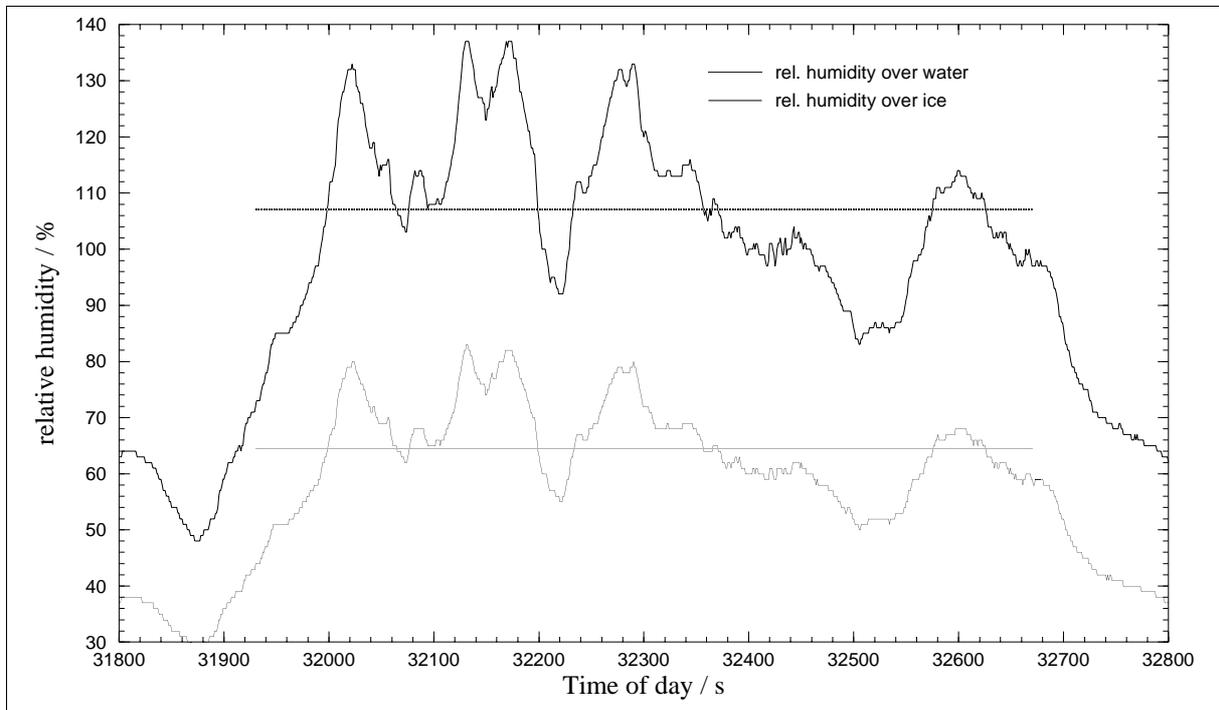


Abb.3: *Detail aus Abb. 2: Für den im Zeitraum 31800 bis 32800 Sekunden sind die Parameter relative Feuchte über Wasser (untere Kurve) und über Eis (obere Kurve) als Funktion der Zeit dargestellt. Die gestrichelt bzw. punktiert eingetragenen Geraden zeigen die jeweiligen Mittelwerte im verwendeten Intervall an.*

In Abb. 3 ist die relative Feuchte über Wasser und Eis in höherer Auflösung dargestellt sowie die Kurven, die den jeweiligen Mittelwerten entsprechen. Man erkennt deutlich die Variation der relative Feuchte über Wasser zwischen etwa 50% und 85%. Die Werte sind abhängig von der Position des Meßflugzeuges relativ zum Zentrum des Kondensstreifens. Dabei repräsentieren die hohen relativen Feuchten eher den Randbereich des Kondensstreifens (größere Teilchen in geringer Konzentration), die niedrigen Feuchten eher das Zentrum. Eine Übersicht der abgeleiteten Werte zeigt Tabelle 2.

Für die Referenzsimulation über eine Dauer von 64 Minuten wurden auf einer CRAY J90 4.5 Stunden CPU Zeit benötigt bei einem Speicherplatzbedarf von ca. 4.5 MW. Dabei wurde alle 20 Zeitschritte, von je 1.5 Sekunden Dauer, eine Zeitscheibe mit allen wichtigen Parametern ausgeschrieben. Aufgeteilt in 4 Portionen (files) zu je 32 Zeitscheiben benötigen die unformatierten Ergebnisse etwa 480 MByte Speicherplatz.

<i>Parameter</i>	<i>Mittel</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Differenz</i>	<i>Standard Abw.</i>
Druck in hPa	288.39	279.9	294.4	14.5	2.35
Temperatur in K	220.11	219.32	220.98	1.66	0.32
Feuchte über Wasser in %	64.48	50	83	33	8.54
Feuchte über Eis in %	107.17	83	137	54	14.32
statische Stabilität in $K m^{-1}$	0.00811				

Tabelle 2: *Übersicht über die aus Messungen abgeleiteten Parameter, die zur Festlegung der großräumigen meteorologischen Umgebungsbedingungen im GSM benötigt werden. Berücksichtigt wurde der Zeitraum zwischen 31930 und 32670 Sekunden während des Meßfluges vom 2.Mai 1996.*

4.1.3 Sensitivitätsstudien

Neben der Referenzsimulation (Variante C) wurden auch Sensitivitätsstudien durchgeführt. Diese sollen darüber Auskunft geben, welchen Einfluß die relative Feuchte der Umgebungsluft und die Form der Eispartikel auf die Entwicklung tropopausennaher Kondensstreifen ausübt.

Wie aus Tabelle 2 zu ersehen ist, weist die Standardabweichung der relativen Feuchte über Wasser innerhalb des Kondensstreifens einen Wert von 9% auf. Da die relative Feuchte der Umgebung ein kritischer Parameter für die weitere Entwicklung des Kondensstreifens darstellt (vergl. CHLOND, 1998), wurde das Modell mit zwei weiteren Werten der relativen Feuchte über Wasser initialisiert (bei gleichbleibender Teilchenform), welche sich vom Referenzwert in Variante C (78%) um jeweils 12% unterscheiden (C1: 66% und C2: 90%).

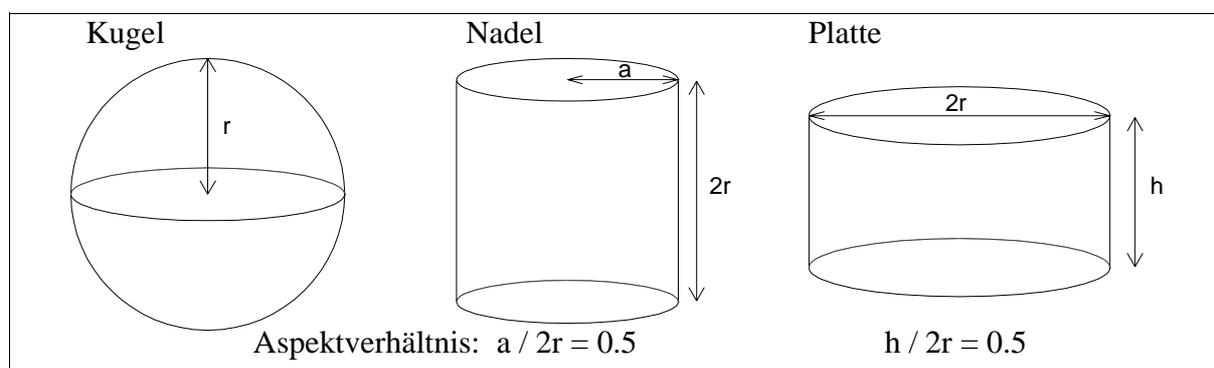


Abb.4: Geometrie der verwendeten Teilchen im Vergleich. Nadel und Platte (Aspektverhältnis $\epsilon=0.5$) sind in der zur Kugelmasse äquivalenten Größe dargestellt.

Um den Einfluß verschiedener Teilchengometrien zu berücksichtigen, wurden auch von der Kugelform abweichende Partikel (s. Abb. 4) angenommen (bei 78% Feuchte). Für die Simulation wurden kurze Nadeln (Modellauf C3) und dicke Platten (Modellauf C4) mit einem Aspektverhältnis von 0.5 entworfen. Die Eispartikelverteilung wurde, wie bereits erwähnt, in 12 Klassen, die einen äquidistanten Abstand auf einer logarithmischen Skala aufweisen, unterteilt. Der Bereich der volumenäquivalenten Radienkoordinate umfaßt den Bereich von 0.5 - 32 μm . Zur Initialisierung des Eispartikelspektrums innerhalb des Kondensstreifens wurde eine monodisperse Verteilung angenommen. Die initiale Eismasse befindet sich bei allen Rechnungen in Klasse 2 mit $r_{\text{eff}} = 0.7 \mu\text{m}$, wobei eine Teilchenkonzentration von 100 cm^{-3} vorgegeben wurde.

Parameter	Kugel	Nadel	Platte
Oberfläche O	$4 \pi r^2$	$8 \pi \epsilon (1+\epsilon) r^2$	$4 \pi (\epsilon+0.5) r^2$
Masse M	$4/3 \pi \rho_i r^3$	$8 \pi \rho_i \epsilon^2 r^3$	$\pi \rho_i \epsilon r^3$
Kapazität C	$2 \pi r$	$r / \ln(1/\epsilon)$	$r \epsilon / \sin^{-1} \epsilon$ mit $e = (1-\epsilon)^{1/2}$
Konstante A	nach Beard (1976)	$8.114 \cdot 10^{-5}$	0.001
Konstante B	nach Beard (1976)	1.585	1.0

Tabelle 3: Zusammenstellung wichtiger Parameter für die verwendeten Eisteilchen.

Ferner wurde im Modell die Berechnung von Sedimentationsgeschwindigkeit und Teilchenwachstum den neuen Teilchengometrien angepaßt. Hierfür wurden einige Parameter (Oberfläche, Masse, Kapazität, etc.) neu bestimmt. Die Abweichung der Teilchen von der Kugelform wurde durch Einbeziehung von Korrekturfaktoren bei der mikrophysikalischen Modellierung

berücksichtigt. Die Berechnung der Fallgeschwindigkeit SG für Nadeln und Platten erfolgte nach der Darstellung von STARR und COX (1985), die folgende Fallgeschwindigkeits-Längenrelation angeben: $SG = A (2r)^B$.

Die Methode zur Berechnung der Kapazitäten (die Kenntnis dieser Größe ist zur Berechnung des Massenwachstums nichtsphärischer Teilchen erforderlich) für Nadeln und Platten wurde PRUPPBACHER und KLETT (1997) entnommen und auf die hier verwendeten Teilchenformen und Aspektverhältnisse angewandt. Eine Auflistung der Kapazitäten, Massen, Oberflächen sowie die Parameter der Fallgeschwindigkeits-Längenrelation ist für die verschiedenen Teilchen in Tabelle 3 gegeben.

4.2 Validierung der Ergebnisse

4.2.1 Vertikalschnitte

Modellvariante	C	C1	C2	C3	C4
Partikelform	Kugel	Kugel	Kugel	Nadel	Platte
Feuchte über Wasser in %	78%	66%	90%	78%	78%
Eisgehalt (mittel) in mg kg^{-1}	10.69	5.88	15.53	13.28	13.20
Eisgehalt (max) mg kg^{-1}	21.03	9.74	33.80	24.02	26.04
Partikelkonzentration (mittel) in 10^7 kg^{-1}	2.795	3.468	2.511	2.547	2.430
Partikelkonzentration (max) in 10^8 kg^{-1}	1.632	1.866	1.592	1.710	1.844
effektiver Radius (mittel) in μm	7.0	5.0	8.4	8.2	8.4
Geschwindigkeit u (max) in m s^{-1}	0.205	0.257	0.223	0.220	0.220
Geschwindigkeit w (max) in m s^{-1}	0.172	0.180	0.166	0.078	0.078

Tabelle 4: Mittlere und maximale Werte ausgewählter Größen für die Referenzsimulation (Variante C) und die 4 Sensitivitätsstudien (Variante C1 bis C4) nach 32 Minuten Modellzeit.

Die Ergebnisse der Referenzsimulation (Variante C) sind in Abb. 5 bis 8 für ausgewählte Zeitpunkte (2, 4, 8, 16, 32 und 48 Minuten) dokumentiert. Dargestellt sind Strömungsfelder sowie Isolinien des Eisgehalts, der Partikelkonzentration und des effektiven Radius in Vertikalschnitten senkrecht zur Flugrichtung. Die angegebenen Zeiten beziehen sich auf die Entwicklungszeit des Kondensstreifen im GSM (Modellzeit). Beim Vergleich dieser Ergebnisse mit denen früherer Simulationsrechnungen (CHLOND, 1998) fällt auf, daß die Kondensstreifenentwicklung nun eine wesentlich markantere und komplexere Dynamik aufweist. Dies kann auf die dynamische Initialisierung der prognostischen Modellvariablen zurückgeführt werden, durch die der Zustand des Strömungsfeldes am Ende des Vortexregimes wesentlich realistischer abgebildet wird als bei früheren Modellrechnungen.

In Tabelle 4 sind darüber hinaus zum besseren Vergleich der verschiedenen Modellläufe maximale und mittlere Werte einer Reihe von mikrophysikalischen Größen der simulierten Kondensstreifen nach einer Modellzeit von 32 Minuten angegeben.

4.2.1.1 Strömungsfeld

In Abb. 5 sind die Vektoren des Geschwindigkeitsfeldes mit überlagerten Isolinien des Eisgehalts eingetragen. Im Gegensatz zu früheren Rechnungen (CHLOND, 1998) bildet sich - bedingt durch die dynamische Initialisierung - ein komplexes Strömungsfeld aus. Das

anfängliche Wirbelpaar zerfällt rasch und es bilden sich eine Reihe organisierter Sekundärwirbel aus, die teilweise sehr kleine Skalen aufweisen. Die Dynamik der Kondensstreifenentwicklung läßt sich mit 6 Zeitscheiben allerdings nicht vollständig reproduzieren. In einer Animation des Eisgehaltes (alle 128 Zeitscheiben mit je 30 Sekunden Abstand) kommt sie aber voll zur Geltung. Besonders die Schwingung des Kondensstreifens mit der Brunt-Väisälä-Frequenz N ist innerhalb der ersten 30 Minuten sehr ausgeprägt. Auch das Aussedimentieren von Eisteilchen ist in einer Animation gut zu verfolgen.

Die Modellläufe C1 (66%) und C2 (90%) zeigen zu allen 6 Zeitpunkten ein ähnliches Strömungsmuster wie die Referenzsimulation, die Modellläufe C3 (Nadeln) und C4 (Platten) weichen etwas stärker davon ab, sind aber untereinander fast gleich. In allen Fällen nehmen im Laufe der Zeit die Werte der Maxima der Windgeschwindigkeitskomponenten u und w nahezu exponentiell ab.

4.2.1.2 Eisgehalt

Die bereits in Abb. 5 mit dargestellten Isolinien des Eisgehaltes sind in Abb. 6 in farbigen Abstufungen dargestellt. Ferner sind über den Kondensstreifen gemittelte Werte ($\langle q_i \rangle$) und maximale Werte ($(q_i)_{\max}$) des Eisgehaltes mit angegeben. Auffällig ist die hohe Konzentration zu Beginn (nach 2 und 4 Minuten) in beiden Teilen des initialen Wirbels (rötliche Färbung). Im weiteren Verlauf der Simulation verschmelzen diese Bereiche zu einem einzigen, mehr fladenförmigen Bereich, in dem lokale Maxima auftreten. In den rötlichen Zonen wird auch der optisch sichtbare Kondensstreifen angesiedelt sein.

Im Modelllauf C1 (66%) kommt es nur kurzfristig (Zeitscheibe nach 4 Minuten) und in einem räumlich eng begrenzten Bereich zur Überschreitung eines maximalen Eisgehaltes von 15 mg/kg, während der Modelllauf C2 (90%) der mittlere Eisgehalt permanent über 15 mg/kg liegt. Bis auf diese quantitativen Unterschiede sind die Kondensstreifen in den drei Varianten mit der Kugel als Teilchen sehr ähnlich. Die Modellläufe C3 (Nadeln) und C4 (Platten) entwickeln eine etwas andere Struktur, zeigen aber qualitativ große Ähnlichkeit mit der Referenzsimulation.

Auch mit dieser Rechnung konnte bestätigt werden, daß die relative Feuchte der Umgebung ein wichtiger Parameter für die Entwicklung eines Kondensstreifens ist (vgl. auch GIERENS, 1996). Die Abhängigkeit von der Teilchengengeometrie ist von vergleichsweise untergeordneter Bedeutung. Zukünftige Untersuchungen müssen jedoch noch klären, ob dies auch für Teilchen mit kleineren Aspektverhältnissen, also für mehr elongierte Teilchen, gilt.

4.2.1.3 Partikelkonzentration

In Abb. 7 sind die Partikelkonzentration sowie deren mittlere ($\langle N \rangle$) und maximale (N_{\max}) Werte dargestellt. Die mittlere Partikelkonzentration nimmt im Laufe der Zeit ab und weist nach 48 Minuten Modellzeit - bedingt durch die Vergrößerung der Querschnittsfläche des Kondensstreifens - eine um etwa eine Größenordnung kleinere Konzentration auf. Die strukturellen Abweichungen in der Entwicklung des Feldes der Partikelkonzentration sind in den Modellläufen C1 bis C4 gering. Für die Nadeln und Platten ergeben sich auch quantitativ die gleichen Maximal- und mittleren Werte. Im Modelllauf C1 (66%) sind die mittleren Partikelkonzentrationen stets etwas höher und im Modelllauf C2 (90%) stets etwas niedriger. Dies bestätigt, daß bei geringerer Feuchtigkeit die Teilchen langsamer wachsen und die Querschnittsänderung des Kondensstreifens kleiner ausfällt, so daß die Teilchenkonzentrationen bei kleineren effektiven Radien höhere Werte zeigen.

4.2.1.4 Effektiver Radius

Abb. 8 zeigt Felder des effektiven Radius und gibt auch den über den Querschnitt des Kondensstreifens gemittelten Wert an. Man erkennt, daß sich das Teilchenwachstum im wesentlichen auf die Ränder des Kondensstreifens beschränkt und daß die Teilchen mit der Zeit größer werden. Die Modellläufe C1 bis C4 weisen fast die gleiche räumliche Struktur auf und unterscheiden sich auch quantitativ nur geringfügig. Wie zu erwarten sind die mittleren effektiven Radien im Modellauf C1 (66%) stets kleiner und bei C2 (90%) stets größer. Die Modellläufe C3 (Nadeln) und C4 (Platten) liefern ähnliche Werte des effektiven Radius wie Modellauf C2.

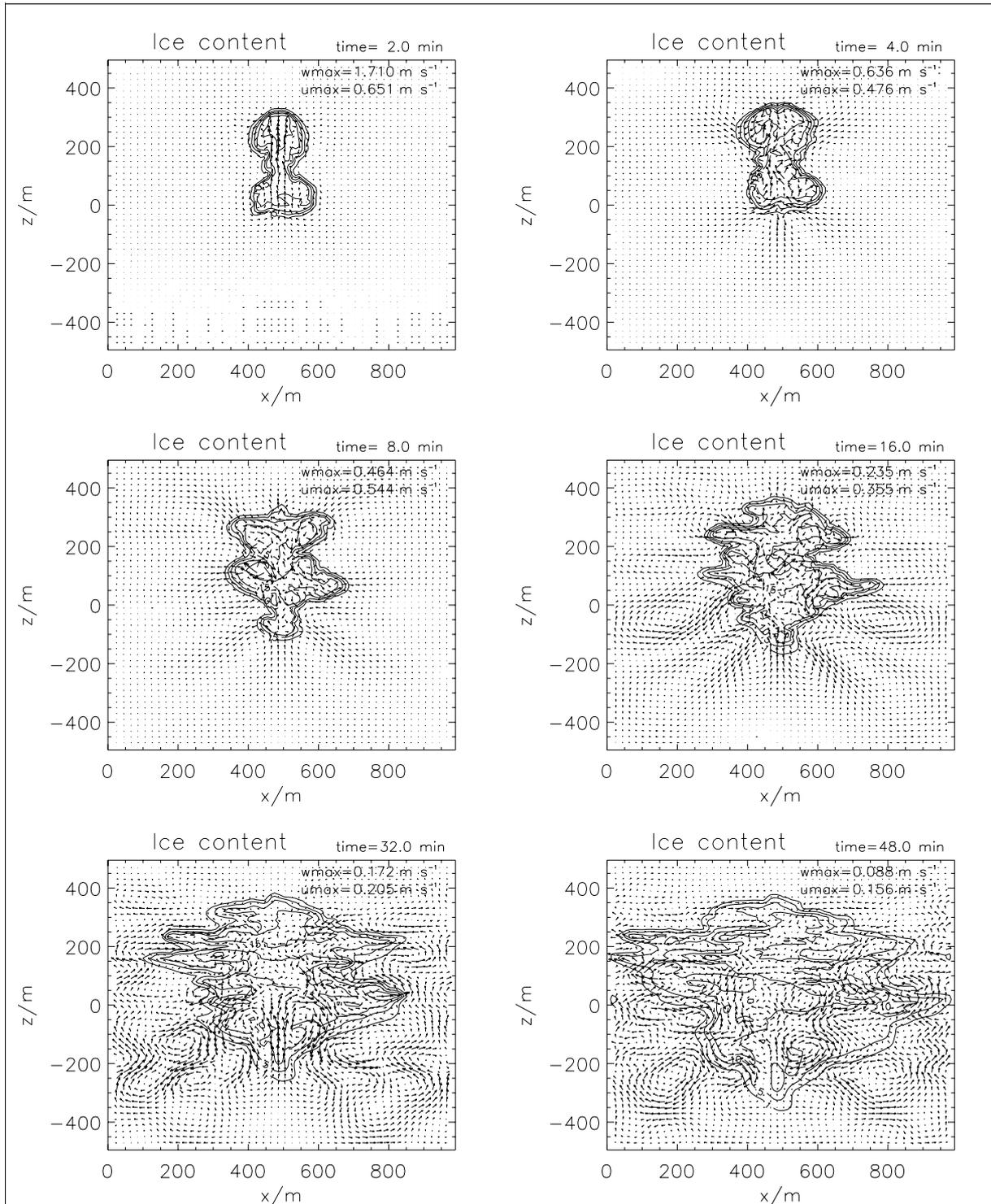


Abb.5: Vektoren des Geschwindigkeitsfeldes mit überlagerten Isolinien des Eisgehaltes für 6 Zeitscheiben der Referenzsimulation.

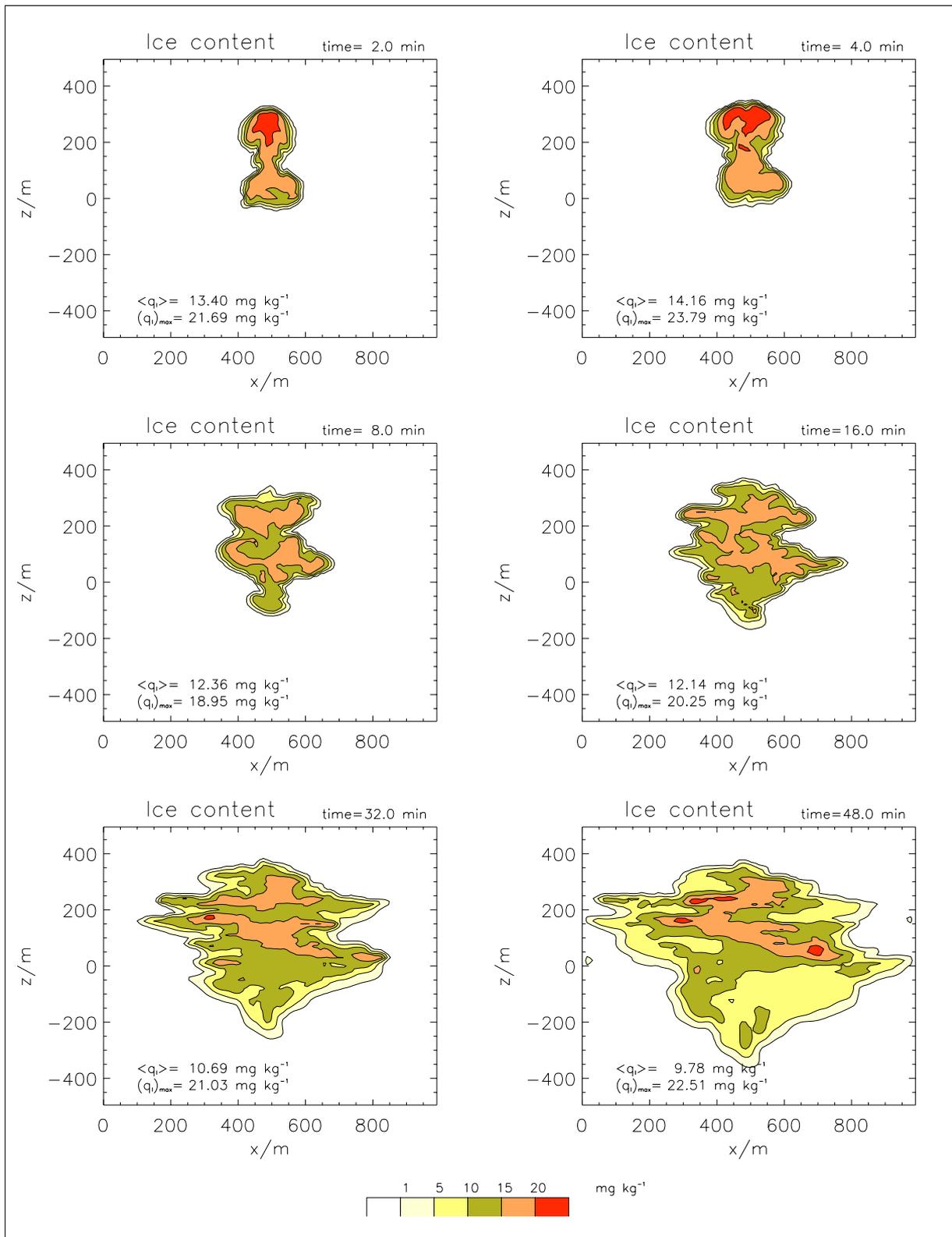


Abb.6: Entwicklung des Eisgehaltes für 6 Zeitscheiben der Referenzsimulation.

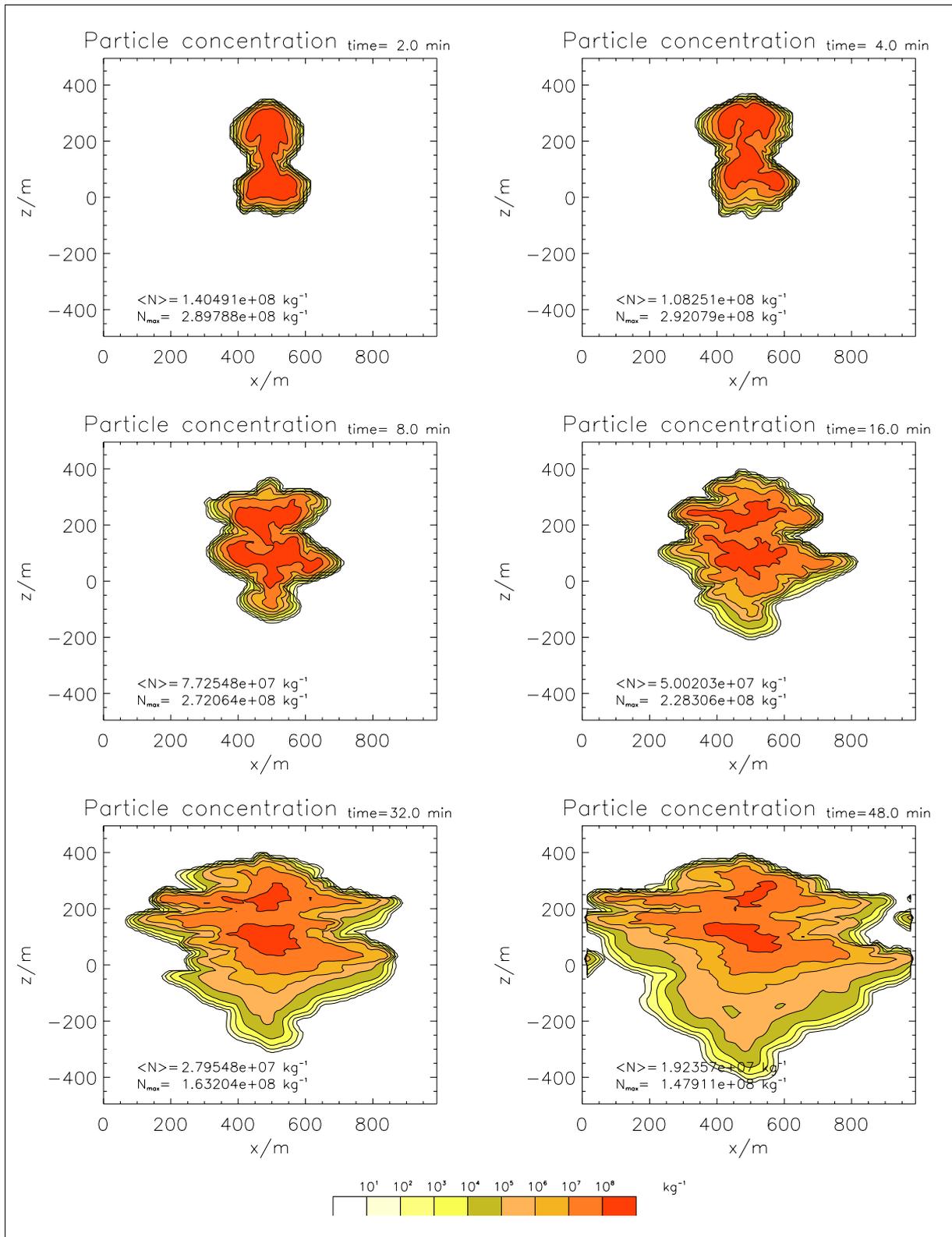


Abb.7: Entwicklung der Partikelkonzentration für 6 Zeitscheiben der Referenzsimulation.

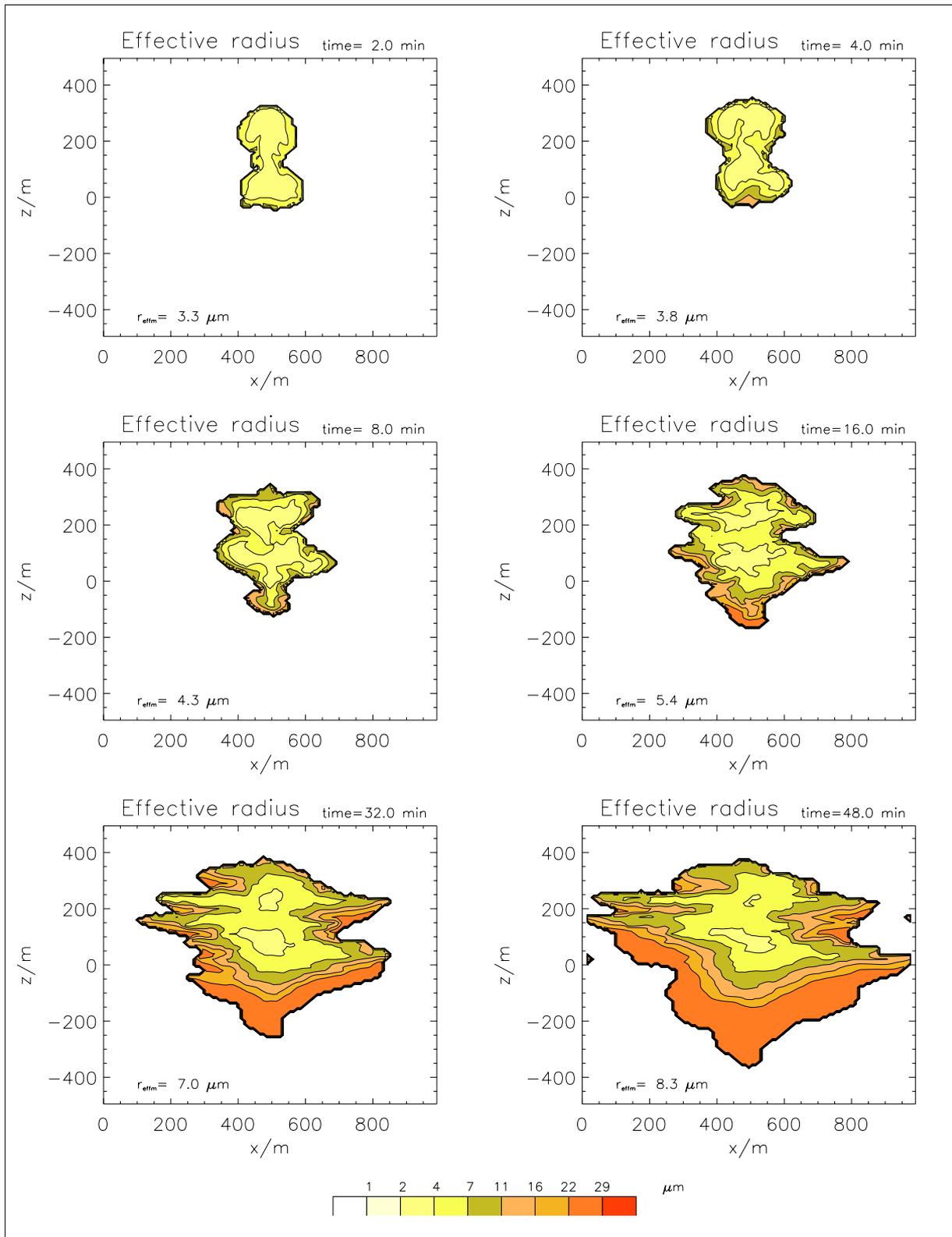


Abb.8: Entwicklung des effektiven Radius für 6 Zeitscheiben der Referenzsimulation.

4.2.2 Zeitserien

4.2.2.1 Zeitliche Entwicklung integraler Größen

Um die zeitliche Entwicklung der verschiedenen Modellrechnungen besser vergleichen zu können, wurden Zeitserien ausgewählter integraler Parameter erstellt. Diese sind in Abb. 9 dargestellt und umfassen:

a) Effektiven Radius

Wie bereits in 3.1.4 erwähnt, nimmt der mittlere effektive Radius in allen Modellläufen mit der Zeit zu, wobei sich das Wachstum der Nadeln und Platten eher wie das der Kugeln bei 90% relativer Feuchte (C2) verhält. Für das Teilchenwachstum spielt die Feuchte der Umgebung eine größere Rolle als die Teilchengenometrie. Die simulierten Werte des effektiven Radius variieren nach einer Simulationszeit von 50 Minuten in einem Bereich von 5 - 10 μm . Die Größe der Eispartikel im Kondensstreifen ist demnach deutlich kleiner als in natürlichen Cirruswolken.

b) Totalen Eisgehalt

Die zeitliche Entwicklung des Eisgehaltes verläuft ähnlich wie beim effektiven Radius. Hier liegt die Zunahme des Eisgehaltes von Nadeln und Platten jedoch eher zwischen der Referenzsimulation (C) und dem Modellauf C2 (90%). Die totale Eismasse der simulierten Kondensstreifen variiert nach einer Simulationszeit von 50 Minuten in den Modellrechnungen von 0.5 bis 2.0 kg m^{-1} . Dieser Wert ist deutlich größer als die vom Flugzeug emittierte Wassermenge (etwa 15 g m^{-1}). Die durch die Kerosinverbrennung erzeugte Wassermenge stößt demnach die Kondensstreifenbildung nur an, der Hauptteil der Eismasse im Kondensstreifen wird durch Phasenumwandlung der in der Umgebungsluft enthaltenen Feuchte produziert.

c) Mittlere optische Dicke

Der Mittelwert der optischen Dicke nimmt in allen Modellrechnungen in den ersten 10 Minuten rasch ab, und bleibt danach in etwa konstant. Die optischen Dicken der simulierten Kondensstreifen weisen nach einer Simulationszeit von etwa 50 Minuten Werte im Bereich von 0.3 - 0.5 auf. Diese Werte befinden sich im Einklang mit aus Messungen abgeleiteten Werten der optische Dicke für Kondensstreifen im Dispersionsregime (JÄGER et al., 1997).

d) Quadrat der horizontalen Halbwertsbreite des Kondensstreifens

Bei der zeitlichen Entwicklung der Kondensstreifenbreite gibt es eine starke Ähnlichkeit zwischen der Referenzsimulation und den Modellläufen C3 (Nadeln) und C4 (Platten). Die Modellläufe C1 und C2 weichen stärker von der Referenzsimulation ab, wobei im Vergleich zur Referenzsimulation im Modellauf C1 eine kleinere und in Modellauf C2 eine größere horizontale Ausbreitung festzustellen ist.

Die aus der zeitlichen Änderung des Quadrates der horizontalen Halbwertsbreite abgeleiteten Diffusionskoeffizienten liegen im Bereich von 12 bis 26 $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$. Die berechneten Werte der horizontalen Ausbreitungskoeffizienten der simulierten Kondensstreifen befinden sich in Übereinstimmung mit experimentellen Befunden. SCHUMANN et al. (1995) führten bei ihrer Kampagne im Oktober 1993 Meßflüge sowohl in Situationen geringer Windscherung durch, als auch bei stärkeren Scherungen (mit Werten bis zu 0.006 s^{-1}). Bei einer Brunt-Väisälä-Frequenz N zwischen 0.014 und 0.019 s^{-1} geben sie für die horizontale Diffusivität das folgende Werteintervall an: $5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} < D_h < 20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Auf der Grundlage von GSM Rechnungen kommt Dürbeck (1997) auf horizontalen Diffusionskoeffizienten zwischen 15.5 und 23.0 $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$.

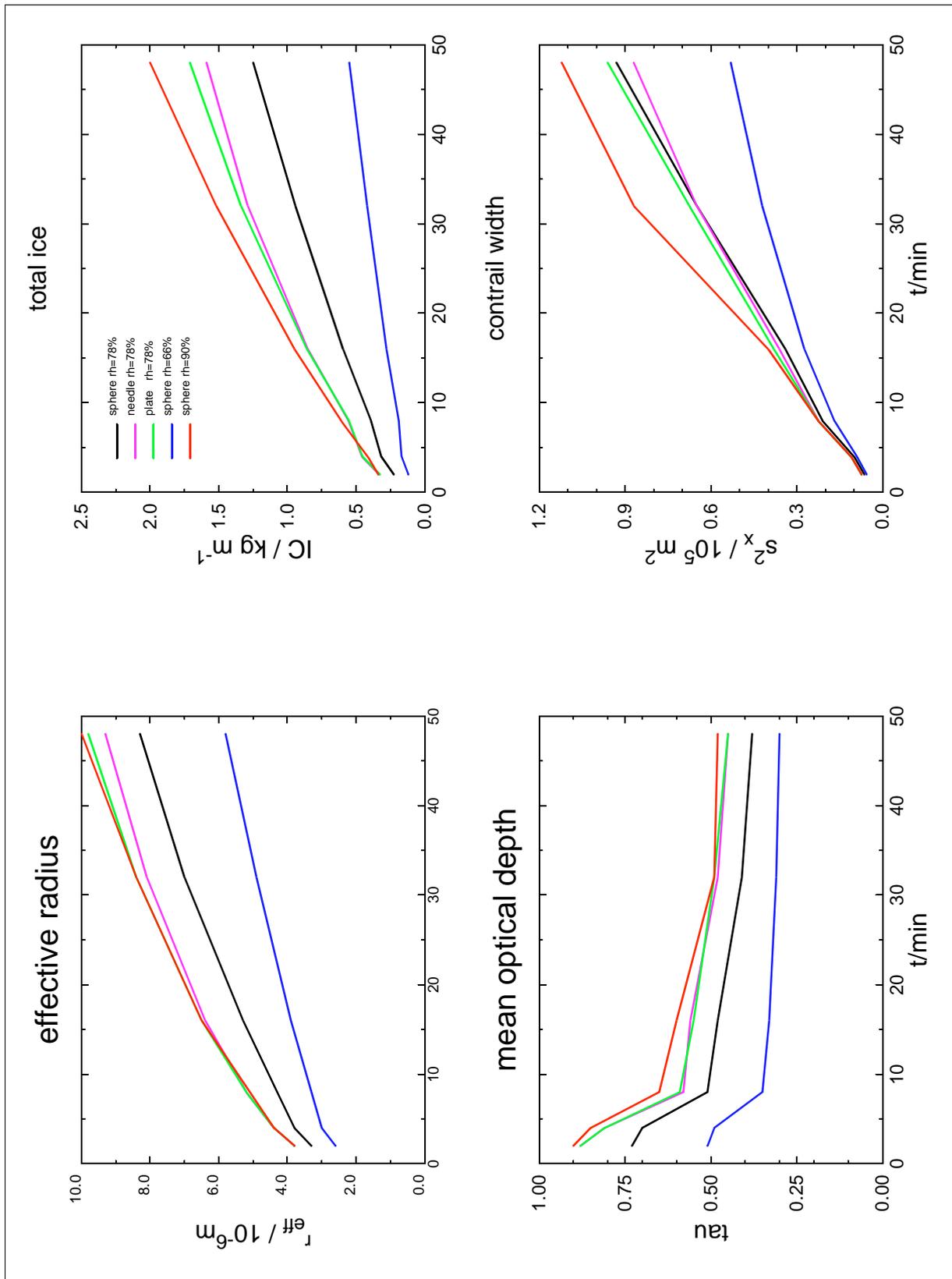


Abb.9: Zeitserien des effektiven Radius, des totalen Eisgehalts, der mittleren optischen Dicke und des Quadrats der Halbwertsbreite des Kondensstreifens für die 5 Modellrechnungen C (Kugel, 78%), C1 (Kugel, 66%), C2 (Kugel, 90%), C3 (Nadel, 78%) und C4 (Platte, 78%) im Vergleich.

4.2.3 Spektren

Ziel der Untersuchungen war unter anderem der Vergleich von Messungen und Modellergebnissen. Dieser Vergleich soll Aufschluß darüber geben, ob die atmosphärischen Zustandsgrößen und die zeitliche Entwicklung von Kondensstreifen durch das Modell richtig wiedergegeben werden. Ein detaillierter Vergleich ist nicht möglich, da bisher kein einzelner Kondensstreifen zu verschiedenen Zeitpunkten seiner Entwicklung vermessen wurde. Aus diesem Grund konnte nur ein qualitativer Vergleich zwischen den Ergebnissen des GSM und Messungen durchgeführt werden. Dazu wurden Meßergebnisse von Kondensstreifen verwendet, die sich zwar in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befanden jedoch während verschiedener Kampagnen vermessen wurden.

Als Vergleichsgröße wurde das Partikelspektrum gewählt, da (a) zahlreiche Messungen dieser Größe vorliegen und (b) die Kenntnis des Partikelspektrums von großer Wichtigkeit für die Beurteilung der optischen Eigenschaften des Kondensstreifens ist. Darüber hinaus erscheint die Annahme, daß die zeitliche Entwicklung des Partikelspektrums in verschiedenen Kondensstreifen ähnlich verläuft, gerechtfertigt.

Als Vergleichsbasis für die simulierten Partikelspektren dient Abb. 4.9 aus WENDLING et al. (1997), die hier in Abb. 10 dargestellt ist. Die Abbildung zeigt gemessene Größenverteilungen von Eiskristallen in Kondensstreifen unterschiedlichen Alters und in Cirren. Das Datum der Messung und das (geschätzte) Alter des Kondensstreifens ist jeweils mit angegeben. Zum Vergleich sind in diese Abbildung zusätzlich die simulierten, über den gesamten Kondensstreifen gemittelte Partikelspektren zur Zeit $t = 2.5$ und $t = 34.5$ Minuten eingetragen und solche, die an drei verschiedenen Positionen innerhalb des Kondensstreifens berechnet wurden (Abb. 11).

In Abb. 10 erkennt man, daß junge Kondensstreifen Anzahlkonzentrationen deutlich über 1000 pro cm^3 (drei Größenordnungen höher als in natürlichen Cirren) aufweisen, wobei der mittlere Durchmesser der Partikel etwa $1 \mu\text{m}$ beträgt. Der mittlere Durchmesser der gemessenen Verteilungen schwankt dabei räumlich und zeitlich rapide zwischen etwa 0.5 und $2 \mu\text{m}$. Mit zunehmendem Alter sinken die Anzahlkonzentrationen um 2 Größenordnungen und der mittlere Durchmesser der Verteilungen wächst auf etwa $10 \mu\text{m}$ an. Die Kurvenschar der mindestens 25 Minuten alten Kondensstreifenstruktur stellt eine generell schwer dokumentierbare Situation im Übergangsbereich zum Cirrus dar. Es ist der bislang einzig beobachtete Fall seiner Art (WENDLING et al., 1997).

Die in Abb. 10 mit dargestellte schwarze Kurve zeigt das bei der Simulation des Kondensstreifens erstellte monodisperse Spektrum der Eisteilchen (gemittelt über den Kondensstreifen) zu Beginn der Simulation (nach 2.5 Minuten) und die rote Kurve bezeichnet die simulierten Spektren nach 34.5 Minuten. Um die Inhomogenitäten des modellierten Kondensstreifens zu dokumentieren, wurden auch Spektren an verschiedenen Positionen innerhalb des Kondensstreifens berechnet. Diese sind als dünnere Kurven (in grün) nach 34.5 Minuten Entwicklungszeit in Abb. 10 mit eingetragen.

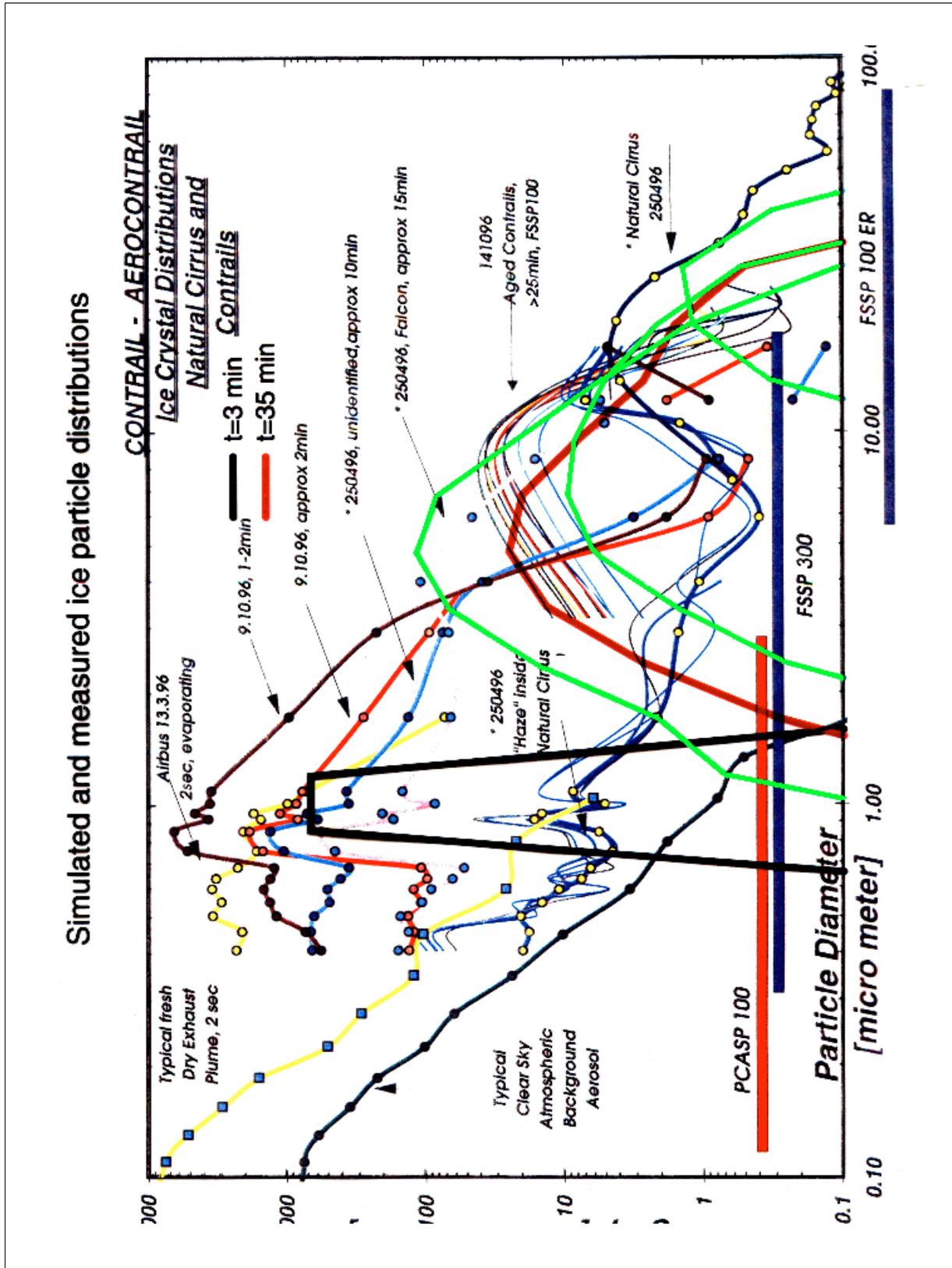


Abb.10: Exemplarische Beispiele von Größenverteilungen von Eiskristallen in Kondensstreifen unterschiedlichen Alters und Cirren (nach Wendling et al., 1997) im Vergleich zu simulierten Partikelspektren zu Zeiten und an drei verschiedenen Positionen innerhalb des Kondensstreifens.

In Abb. 11 sind die 3 Positionen in zwei Vertikalschnitten des normierten Eisgehalts nach 32 und 48 Modellminuten markiert. Ausgewählt wurde ein Punkt im Zentrum des Kondensstreifens (1) sowie zwei an seinen Randbereichen (2) und (3). Nach 48 Minuten Simulationszeit liegen diese in Bereich eines lokalen Maximums bzw. Minimums des Eisgehalts (Ort 2 bzw. 3). Wie zu erwarten, befinden sich die meisten (und kleinsten) Teilchen im Zentrum des Kondensstreifens und nur wenige (dafür jedoch größere) an seinen Rändern. An Position 3 werden nach 32 Minuten schon Teilchen angetroffen, deren maximale Größe $30\ \mu\text{m}$ erreicht.

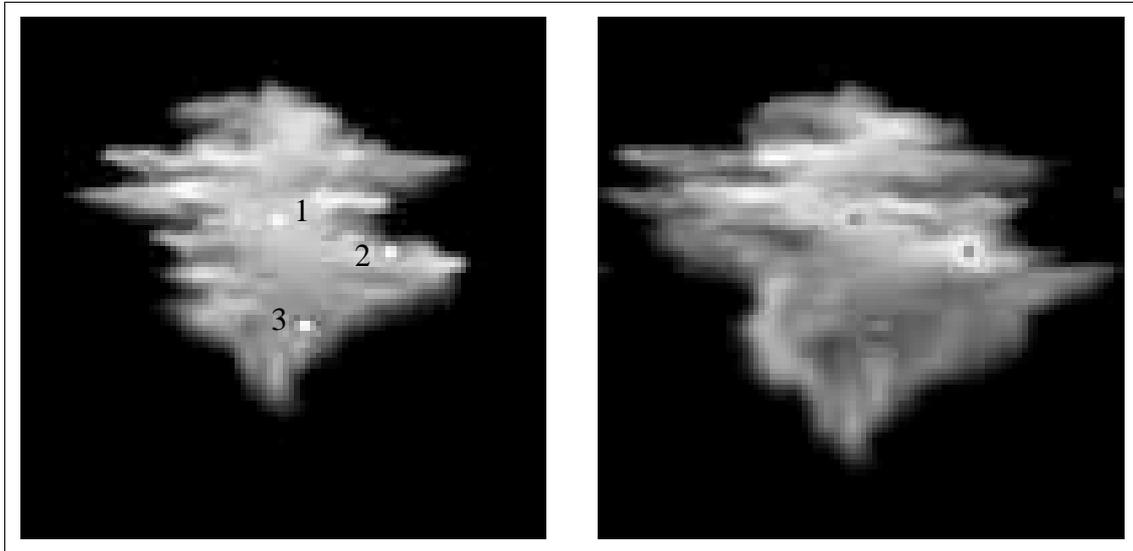


Abb.11: Der normierte Eisgehalt des Kondensstreifens nach 32 (links) und 48 (rechts) Modellminuten in der Referenzsimulation. Die Positionen 1 bis 3 beziehen sich auf die Punkte, an denen Partikelspektren bestimmt wurden, die in Abb. 10 als grüne Kurven mit eingetragen sind.

Beim Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Spektren läßt sich folgendes feststellen: Die Lage des Maximums des Partikelspektrums sowie die Form der Kurve wird vom Modell richtig wiedergegeben. Darüber hinaus weisen auch die simulierten Partikelkonzentrationen Werte in der gleichen Größenordnung wie die gemessenen auf. Das läßt darauf schließen, daß die zeitliche Änderung der geometrischen Querschnittsfläche der Kondensstreifen vom GSM korrekt nachgebildet wird.

Abschließend muß noch festgestellt werden, daß der Vergleich zwischen simulierten und vermessenen Kondensstreifen qualitativ bleiben muß, da ein einzelner Kondensstreifen leider niemals zu verschiedenen Zeitpunkten vermessen wurde. Dennoch kann festgestellt werden, daß das GSM offensichtlich in der Lage ist, die Messungen hinsichtlich der Entwicklung der Partikelspektren annähernd zu reproduzieren.

4.3 Strahlungstransportrechnungen

In Phase II wurde zunächst eine breitbandige Version des Strahlungsmodells erstellt, die es ermöglicht Rechnungen über den gesamten solaren und infraroten Spektralbereich durchzuführen. Hierzu wurde die Gasabsorption durch eine k -Verteilungsmethode sowie die Parameterisierung der optischen Eigenschaften für die gewählten Spektralbereiche in das Modell integriert.

Aufgrund der geringen optischen Dicke des mit dem Grobstruktursimulationsmodells simulierten Kondensstreifens im solaren Spektralbereich hat es sich als günstig erwiesen für diesen Spektralbereich ein dreidimensionales Strahlungsmodell zu verwenden, das nach dem Verfahren der diskreten Ordinaten arbeitet. Dieses Modell wurde freundlicherweise von K. F. Evans zur Verfügung gestellt und ist in EVANS (1997) beschrieben. Dieses Modell ist zwar von seiner Lösungsmethode her nicht so genau wie das innerhalb des Projektes entwickelte Modell, hat aber gerade bei optisch dünnen Medien erhebliche Laufzeitvorteile bei nur relativ geringem Genauigkeitsverlust.

Die Abschnitte 4.3.2 und 4.3.3 beschreiben das Sensitivitätsexperiment bezüglich der Genauigkeit einer Vierstromapproximation bei der Berechnung zweidimensionaler Felder der Strahlungsflußdichte sowie die Rechnungen zum Wolkenalbedobias im Klimamodell.

4.3.1 Erweiterungen des Strahlungsmodells

Für Strahlungstransportrechnungen für die Ergebnisse des in CHLOND (1998) beschriebenen Kontrolllaufes einer Kondensstreifenentwicklung über den gesamten solaren und infraroten Spektralbereich war es notwendig sowohl die optischen Eigenschaften zu parameterisieren als auch die Absorption der Gase in den jeweiligen Spektralbereichen in die Modelle zu integrieren.

4.3.1.1 Gasabsorption

Die Basis einer breitbandigen Integration der linienförmigen Gasabsorption ist die korrelierte k -Verteilungsmethode. Hier wird speziell die Parameterisierung von FU und LIOU (1992) benutzt. Diese weist zwar, im Vergleich zu der von HOLLWEG (1993) entwickelten multivariaten k -Verteilung, größere Fehler in den Strahlungsflußdichten und Abkühlungsraten in der oberen Stratosphäre auf, ist aber für den hier betrachteten Fall eines Kondensstreifens in der oberen Troposphäre ausreichend. Die Aufteilung des Spektrums, die berücksichtigten Absorber und die jeweilige Anzahl der verwendeten k -Terme ist in Tabelle 5 gegeben.

4.3.1.2 Optische Eigenschaften

Aus der Grobstruktursimulation werden sechs in Flugrichtung gemittelte Zeitscheiben bei 2, 4, 8, 14, 22 und 30 Minuten (dies entspricht Kondensstreifenaltern von ca. 12 bis 40 Minuten) entnommen. Das Modell liefert Eiswassergehalt, effektiven Radius (r_{eff}), Anzahldichte der Eisteilchen sowie eine Größenverteilung aufgeteilt in 12 Klassen an jedem Gitterpunkt. Als Eingabedaten für die Strahlungstransportmodelle wird der Extinktionskoeffizient, die Einfachstreualbedo sowie die Entwicklungskoeffizienten der Legendreentwicklung der Phasenfunktion an jedem Gitterpunkt benötigt. Diese müssen aus den gegebenen mikrophysikalischen Modelldaten parameterisiert werden.

Band	Region cm^{-1}	Region μm	N	Gase
Solares Spektrum				
1	50000-14500	0,2-0,7	10	O_3
2	14500-7700	0,7-1,3	8	H_2O
3	7700-5250	1,3-1,9	12	H_2O
4	5250-4000	1,9-2,5	7	H_2O
5	4000-2850	2,5-3,5	12	H_2O
6	2850-2500	3,5-4,0	5	H_2O
Infrarotes Spektrum				
7	2200-1900	4,55-5,26	2	H_2O
8	1900-1700	5,26-5,88	3	H_2O
9	1700-1400	5,88-7,14	4	H_2O
10	1400-1250	7,14-8	4	H_2O, CH_4, N_2O
11	1250-1100	8-9,1	3	H_2O, CH_4, N_2O
12	1100-980	9,1-10,2	5	H_2O, O_3
13	980-800	10,2-12,5	2	H_2O
14	800-670	12,5-14,93	10	H_2O, CO_2
15	670-540	14,93-18,52	12	H_2O, CO_2
16	540-400	18,52-25	7	H_2O
17	400-280	25-35,7	7	H_2O
18	280-0	35,7- ∞	8	H_2O

Tabelle 5: Spektrale Aufteilung und Anzahl der k -Terme (nach FU und LIOU, 1992).

Kürzlich veröffentlichte Messungen der mikrophysikalischen Eigenschaften von Kondensstreifen (z.B. GAYET et al. 1996; MINNIS et al., 1997 und STRAUSS et al., 1997) legen die Annahme nahe, daß in der hier modellierten Entwicklungszeit des Kondensstreifens die Teilchenform durchaus noch als kugelförmig anzunehmen ist. Deshalb wird für die Parameterisierung der optischen Eigenschaften eine Mierechnung durchgeführt. Da an jedem Gitterpunkt eine andere Größenverteilung vorhanden ist, müßte eigentlich für jeden Gitterpunkt für die explizite Größenverteilung für jeden Zeitpunkt eine Mierechnung durchgeführt werden. Da der Rechenzeitaufwand hierfür immens wäre, wurde auf dieses Vorgehen verzichtet. Die mittlere Größenverteilung aller Zeitscheiben entspricht ziemlich gut einer Gammaverteilung. Dies wurde zum Anlaß genommen die optischen Eigenschaften nur als Funktion des Eiswassergehaltes und des effektiven Radius unter Verwendung einer Gammaverteilung zu parameterisieren, deren Parameter die mittlere Größenverteilung so gut wie möglich wiedergeben. Dabei wurde darauf geachtet, daß insbesondere der Bereich der kleinen Teilchen, bei denen jeweils das Maximum der Größenverteilungen liegt, durch die Gammaverteilung gut repräsentiert wird. Um den gesamten Bereich der vorkommenden effektiven Radien erfassen zu können,

wurde ein Mietabelle für effektive Radien von $0.5 \mu\text{m}$ bis $55 \mu\text{m}$ mit einem Abstand von $0.5 \mu\text{m}$ für einen Eiswassergehalt von 1 gcm^{-3} erstellt. Die Gammaverteilungen für jeden effektiven Radius erstrecken sich von $r_{min} = 0.01 * r_{eff}$ bis $r_{max} = 4 * r_{eff}$. Als Anzahl der Stützstellen innerhalb jeder Gammaverteilung wurde der doppelte Wert des maximalen Größenparameters bei der entsprechenden Wellenlänge gewählt. Die Refraktionsindizes für die in Tabelle 5 gegebenen Wellenzahlintervalle wurden jeweils über den Spektralbereich mit der Planckfunktion gewichtet gemittelt, während für die Mierechnung die zentrale Wellenlänge verwendet wurde. Für die auf dem Gitter des Grobstruktursimulationsmodells vorliegenden effektiven Radien werden dann der Extinktionskoeffizient und die Einfachstreueralbedo linear im effektiven Radius interpoliert. Der tatsächliche Extinktionskoeffizient an einem Gitterpunkt ergibt sich dann durch Multiplikation mit dem Eiswassergehalt des Gitterpunktes. Von den Entwicklungskoeffizienten der Legendreihe, die die Phasenfunktion repräsentieren, werden die desjenigen effektiven Radius verwendet, der am nächsten an dem des Gitterpunktes liegt. Im solaren Spektralbereich werden die optischen Parameter noch mit der δ - M Methode nach WISCOMBE (1977) skaliert.

Beispielhaft seien zwei Extinktionsfelder für den solaren (Band 1: $0,2 - 0,7 \mu\text{m}$) und den infraroten Spektralbereich (Band 13: Fenster bei $11 \mu\text{m}$) in Abb. 12 und Abb. 13 gezeigt. Dargestellt ist jeweils der Extinktionskoeffizient in km^{-1} für die oben angesprochenen sechs Zeitscheiben. Die kleinsten Partikel sind im Zentrum des Kondensstreifens anzutreffen wo sie auch den Hauptteil des Eiswassergehaltes des Kondensstreifens ausmachen. Konsequenterweise erhält man deswegen im Zentrum des Kondensstreifens die größten Extinktionskoeffizienten. Die relativ großen Teilchen, die unten bereits aus dem Kondensstreifen heraus sedimentieren tragen so gut wie nichts zur Extinktion bei, sorgen aber für eine vertikale Schichtung des effektiven Radius und nachfolgend der Extinktion. Die größten Extinktionskoeffizienten treten im ganz jungen Kondensstreifen auf, wenn das Teilchenspektrum nur Teilchen zwischen 2 und $6 \mu\text{m}$ enthält. Durch das Wachstum der Eispartikel verringern sich die Maxima der gezeigten Extinktionsfelder von $8,3 \text{ km}^{-1}$ im solaren und von $5,5 \text{ km}^{-1}$ im infraroten Spektralbereich nach zwei Minuten Simulationszeit auf $2,9 \text{ km}^{-1}$ bzw. $2,7 \text{ km}^{-1}$ nach 30 Minuten. Der abnehmende Unterschied zwischen solarem und infraroten Spektralbereich ist darauf zurückzuführen, daß die Wellenlängenabhängigkeit der Extinktion für effektive Radien größer als $5 \mu\text{m}$ stark abnimmt. Das Extinktionsfeld ist in allen Spektralabschnitten horizontal relativ homogen, wobei nur an den Rändern des Kondensstreifens größere Gradienten auftreten. Welchen Einfluß diese relativ schwachen Inhomogenitäten auf die Ergebnisse bei unterschiedlicher Anwendung der Strahlungstransportmodelle (1-dimensional und 2-dimensional) hat wird in Abschnitt 4.3.3 weiter diskutiert.

Die Felder der Einfachstreueralbedo haben im solaren Spektralbereich überall einen Wert sehr nahe an eins, mit der Ausnahme von signifikanter Absorption für Wellenlängen in Band 5 ($\sim 3 \mu\text{m}$). Für große Partikel nach 30 Minuten Simulationszeit tritt auch in Band 4 im unteren Bereich des Kondensstreifens eine signifikante Absorption auf. Im langwelligen Spektralbereich ist die Einfachstreueralbedo im atmosphärischen Fenster am kleinsten, d.h. die Absorption am größten mit Einfachstreueralbeden zwischen $0,35$ und $0,55$.

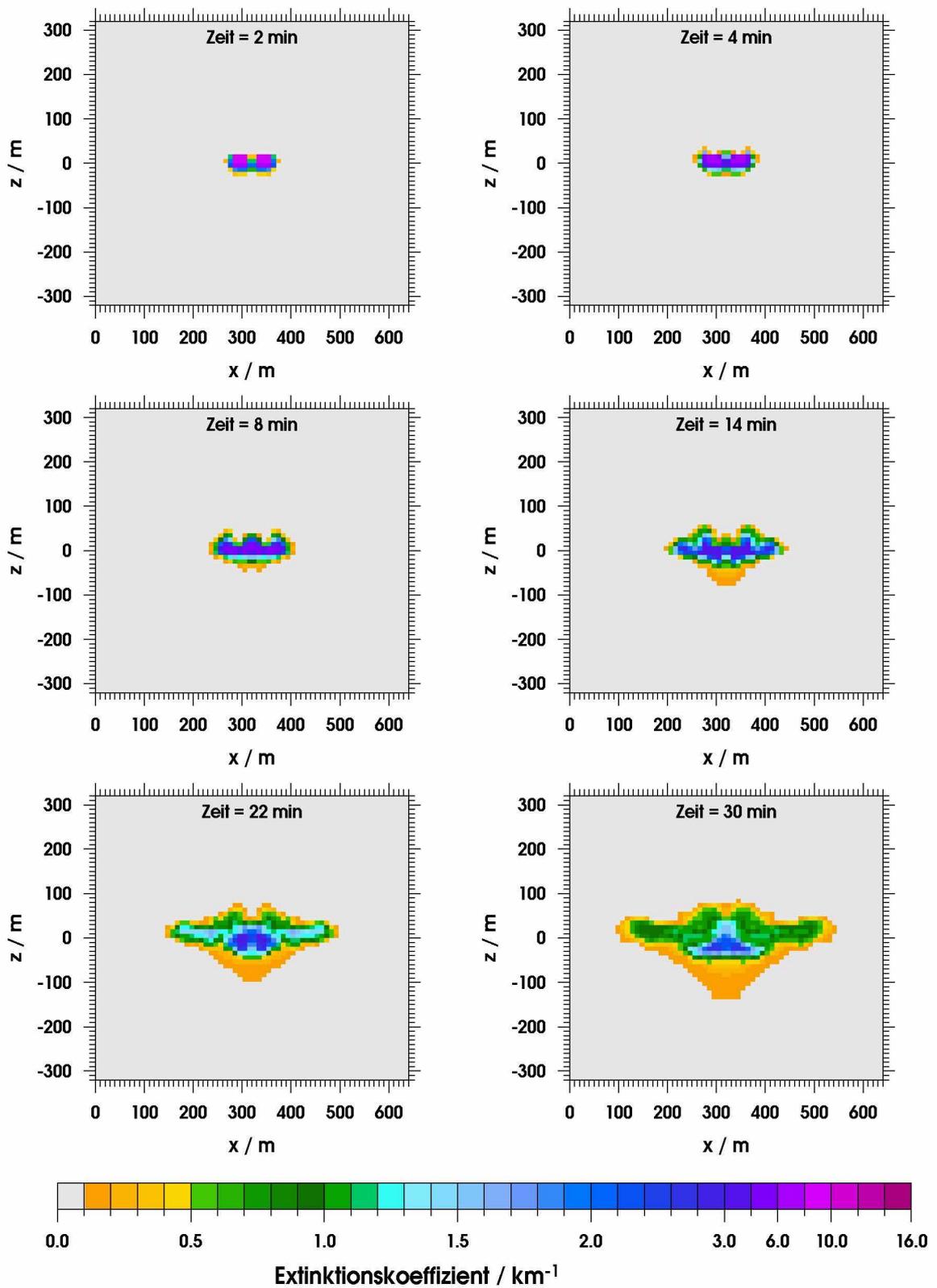


Abb.12: *Parameterisierter Extinktionskoeffizient im solaren Spektralbereich (Band 1) zwischen 0,2 - 0,7 μm für sechs Zeitscheiben der Grobstruktursimulation.*

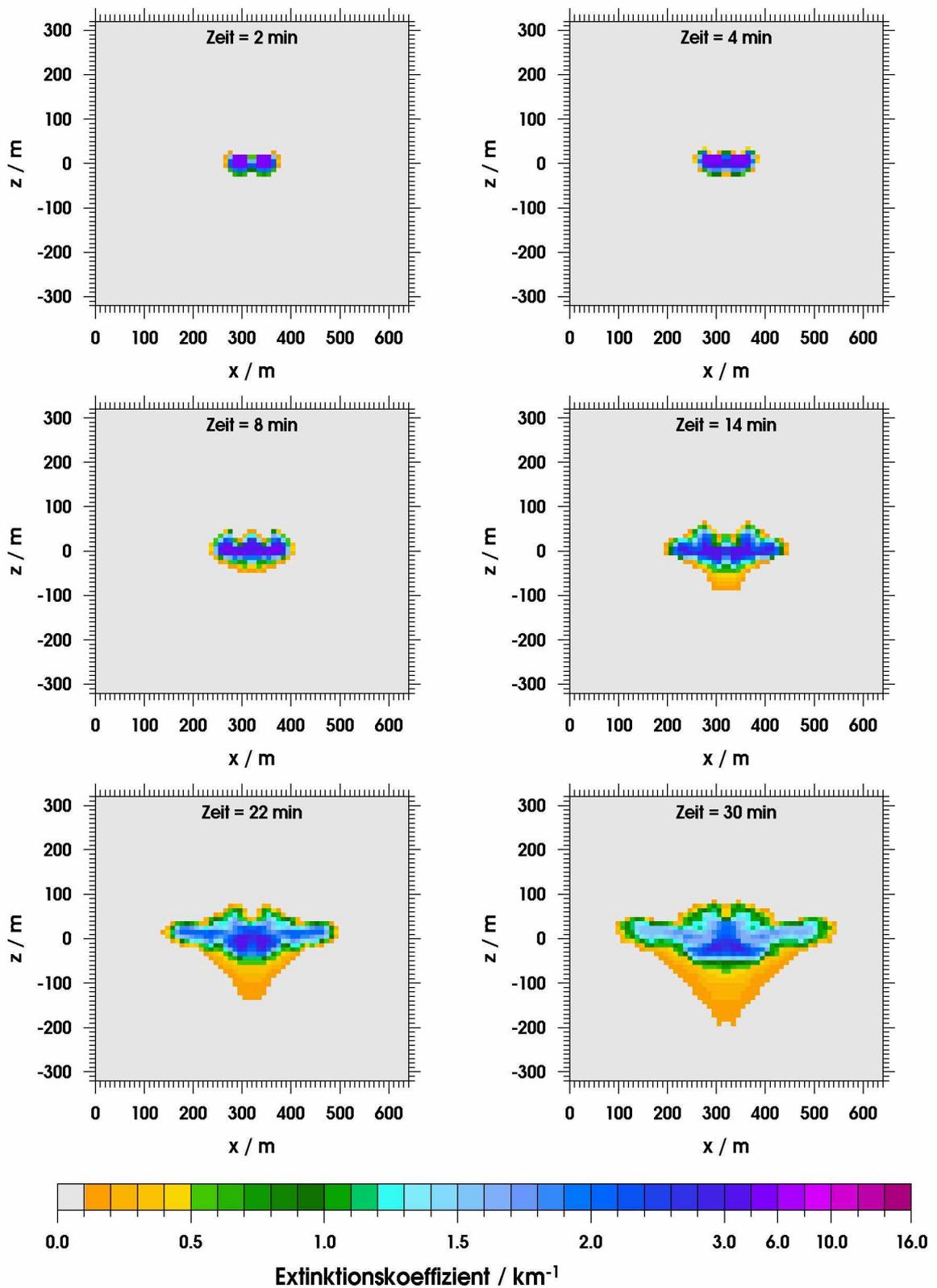


Abb.13: Wie Abb. 12 nur im Infraroten (Band 13) zwischen 10,2 und 12,5 μm Wellenlänge.

Der Asymmetrieparameter nimmt im solaren mit zunehmender Wellenlänge und Absorption zu. Der Asymmetrieparameter und die Einfachstreueralbedo können durch die Annahme der Kugelförmigkeit der Teilchen überschätzt bzw. unterschätzt sein, wenn in einem tatsächlichen Kondensstreifen hauptsächlich hexagonale Teilchen vorhanden sind. Sollte dies der Fall sein ist eine stärkere Rückstreuung durch den Kondensstreifen zu erwarten. Für den langwelligeren Teil des Spektrums zeigt der Asymmetrieparameter Werte nahe eins, also fast reine Vorwärtsstreuung für die großen Teilchen nach 30 Minuten und kleinere Werte zwischen 0,3 und 0,8 für die kleineren Teilchen bei beiden Zeitscheiben, wobei der Asymmetrieparameter mit der Wellenlänge abnimmt. Im Fensterbereich bei 11 μm findet man Werte um 0,7, die grob mit den von STEPHENS (1980) für säulenförmige Eisteilchen übereinstimmen, so daß durch die Annahme der Kugelform keine großen Fehler verursacht werden.

4.3.2 Sensitivitätsstudie zur Genauigkeit einer Vierstromapproximation

Der Effekt den eine starke Vereinfachung der Phasenfunktion auf die Ergebnisse einer Strahlungstransportsimulation haben kann ist dort am größten, wo Streuprozesse die Hauptrolle spielen, also im solaren Spektralbereich. Da es bei dem im Antrag genannten Strahlungstransportmodell nach der „Discrete Angle Method“ (LOVEJOY et al., 1990 oder auch GIERENS, 1993) große Schwierigkeiten gibt verschiedene solare Einfallswinkel zu realisieren wurde das oben erwähnte diskrete Ordinatenmodell nach EVANS (1997) für diese Betrachtung verwendet. Dieses Modell ist bei der Verwendung von nur vier Ordinaten im Prinzip äquivalent zum „Discrete Angle“ Formalismus.

		Relative Standardabweichung							
		Solar (Band 1)						Infrarot (Band 13)	
		$\theta_0=0^\circ$		$\theta_0=45^\circ$		$\theta_0=75^\circ$			
N_μ	N_ϕ	F^\uparrow	F^\downarrow	F^\uparrow	F^\downarrow	F^\uparrow	F^\downarrow	F^\uparrow	F^\downarrow
Mittelwert		83,25	581,6	71,40	402,6	44,01	128,4	49,48	1,647
2	4	0,0113	0,0196	0,0254	0,0255	0,0472	0,0576	0,0162	0,3089
4	8	0,0067	0,0102	0,0090	0,0116	0,0417	0,0337	0,0102	0,3671
6	12	0,0018	0,0020	0,0025	0,0104	0,0192	0,0112	0,0012	0,0942
8	16	0,0014	0,0018	0,0024	0,0048	0,0119	0,0154	0,0015	0,0675
12	24	0,0019	0,0003	0,0007	0,0022	0,0037	0,0130	0,0007	0,0278

Tabelle 6: Relative Standardabweichung der Strahlungsflußdichten für Zeitscheibe 6 direkt oberhalb und unterhalb des Kondensstreifens. Gezeigt sind Vergleiche für verschiedene Winkelauflösungen im solaren und infraroten Spektralbereich. Die Mittelwerte sind in Wm^{-2} angegeben.

Die Unterschiede zwischen den Lösungen mit geringer und hoher Winkelauflösung werden für die Spektralbereiche 1 und 13 und die Zeitscheibe 6 (30 Minuten Simulationszeit) miteinander verglichen. Die Zeitscheibe 6 wird verwendet, weil der simulierte Kondensstreifen nach dieser Zeit Teilchen in allen Größenklassen enthält und ein Vergleich sich somit nicht nur auf die Fälle mit sehr kleinen Teilchen beschränkt. Für Spektralbereich 1 wird noch zwischen den Sonnenzenitwinkeln 0° , 45° und 75° unterschieden wobei der Sonnenazimut gleich null gesetzt worden ist, so daß die Sonne senkrecht von oben bzw. von links oben auf das Modellge-

biet scheint. Da das modellierte Gebiet des Grobstruktursimulationsmodells nur eine vertikale Erstreckung von 640 m zentriert in einer Höhe von 10,5 km hat muß insbesondere die Atmosphäre bis zum Boden ergänzt werden. Hier wurde eine US-Standardatmosphäre mit einer Oberflächentemperatur von 288 K angehängt. Im solaren Spektralbereich wurde ein Lambertscher Reflektor mit einer Bodenalbedo von 0.06 verwendet. Im infraroten Spektralbereich wurde die Bodenemissivität auf 0.98 gesetzt und die von oben kommende diffuse Strahlung vernachlässigt.

Tabelle 6 zeigt die relativen Standardabweichungen der Strahlungsflußdichten für die Simulationszeit 30 min. Die Vergleiche für die abwärtsgerichteten Strahlungsflußdichten sind direkt unterhalb der Wolke und die für die aufwärtsgerichteten Strahlungsflußdichten direkt oberhalb der Wolke durchgeführt worden. Der angegebene Mittelwert bezieht sich auf eine Auflösung von 16 zenitalen und 32 azimutalen Ordinaten, der nach Angaben von EVANS (1997) eine Abweichung zu Monte Carlo Simulationen von weniger als einem Prozent aufweisen dürfte und deswegen hier als Vergleichsstandard geeignet erscheint. Die Winkelauflösung $N_\mu=2$ und $N_\phi=4$ repräsentiert in diesem Vergleich die „Vierstromapproximation“, also das was ein „Discrete Angle“ Modell berechnen würde. Die Abweichungen dieser Auflösung liegen für den senkrechten Einfall solarer Strahlung bei ca. einem Prozent für die reflektierte Strahlungsflußdichte, sowie bei ca. 2% für die transmittierte Strahlungsflußdichte. Die Abweichungen nehmen mit größer werdenden Sonnenzenitwinkeln zu und erreichen bei $\theta_0=75^\circ$ vier bzw. fünf Prozent, wobei noch einmal betont werden muß, daß die Realisierung von schräg einfallender Solarstrahlung beim „Discrete Angle“ Modell nicht gelöst ist. Grundsätzlich kann im solaren Spektralbereich ausgesagt werden, daß für die Berechnungen von Strahlungsflußdichten an einzelnen Gitterpunkten eine moderate Winkelauflösung ($N_\mu=8$ und $N_\phi=16$) notwendig ist. Die Abweichungen nehmen bei noch höheren Winkelauflösungen nur noch langsam ab bzw. sogar zu, weil für diese hohen Winkelauflösungen die räumliche Auflösung nicht ausreichend ist, um weitere Verbesserungen zu erzielen.

Im infraroten Spektralbereich ist das Verhalten ähnlich wie im solaren, d.h. abnehmende Abweichungen mit höherer Winkelauflösung. Besonders auffällig ist, daß die Abweichung für die „Vierstromapproximation“ bei der abwärtsgerichteten Strahlungsflußdichte mit ca. 30% doch erheblich ist. Dies liegt sicherlich an der ziemlich geringen Größe der abwärtsgerichteten Strahlungsflußdichte, so daß geringe absolute Abweichungen bereits große relative Abweichungen bedeuten. Die Wirkung der Vernachlässigung der Streuung im Infraroten wurde nicht untersucht, da es keine prinzipielle Schwierigkeit gibt Streuprozesse im „Discrete Angle“ Modell zu berücksichtigen.

4.3.3 Rechnungen zur Parameterisierung der optischen Dicke im Klimamodell

In Klimamodellen werden Wolken also auch Kondensstreifen nur durch die Angabe eines mittleren Flüssigwasser- oder Eisgehaltes und eines Bedeckungsgrades charakterisiert. Sie werden also als vertikal und horizontal homogen betrachtet. Die Erfahrung bei Stratocumuluswolken hat gezeigt, daß diese notwendige Betrachtungsweise zu einer Überschätzung der Wolkenalbedo führt, die durch künstliche Eingriffe in das Modell ausgeglichen werden muß. Hier soll mit Hilfe des 3D-Strahlungsmodells untersucht werden inwieweit diese Repräsentation der Kondensstreifen die Albedo im solaren Spektralbereich beeinflusst. Hierzu werden Vergleiche zwischen Modellergebnissen, die die horizontale Strahlungswechselwirkung berücksichtigen (2D) und denen die dies nicht tun, der sogenannten „Independent Pixel“ Approximation (IPA), sowie planparallelen (PP) Ergebnissen für horizontal homogene Verhältnisse durchgeführt.

Der Unterschied zwischen 2D und IPA beschreibt dabei nur die Wirkung der Vernachlässigung des horizontalen Strahlungstransports, während der Unterschied IPA-PP den Effekt der Nichtauflösung der Struktur des Extinktionsfeldes angibt.

Es wurden Strahlungstransportrechnungen für alle in Tabelle 5 aufgeführten Spektralbereiche sowie für alle sechs Zeitscheiben der Kondensstreifenentwicklung durchgeführt. Sonnenzenitwinkel, Bodenalbedo, Bodenemissivität, Oberflächentemperatur sowie die ergänzenden Vertikalprofile von Temperatur und Feuchte wurden wie in Abschnitt Tabelle 4.3.2 gewählt. Im folgenden werden einige ausgewählte Ergebnisse diskutiert.

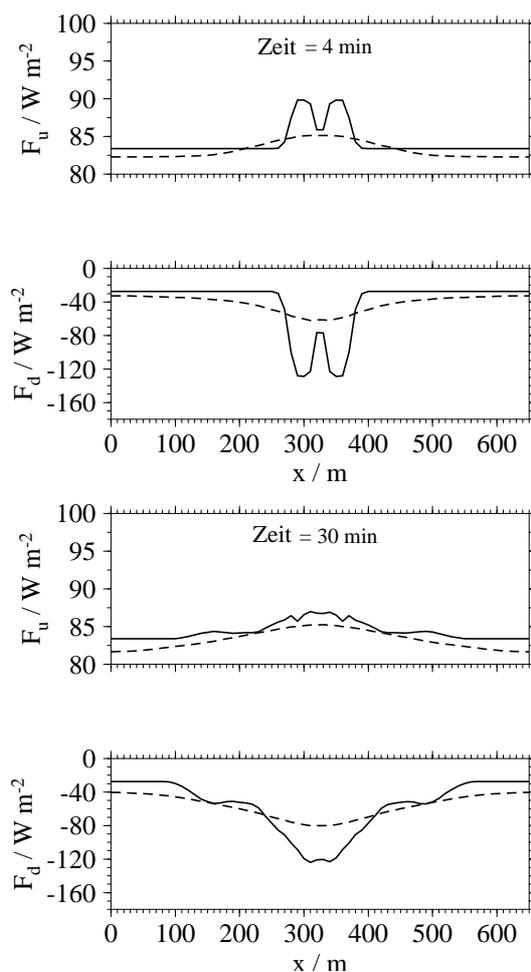


Abb.14: Auf- und Abwärtsgerichtete diffuse Strahlungsflußdichten direkt oberhalb und unterhalb des simulierten Kondensstreifens im sichtbaren Spektralbereich für zwei Entwicklungsstadien (4 und 30 min) der GSM. Durchgezogene Linien kennzeichnen die IPA und gestrichelte Linien die 2D Lösung.

Um die Unterschiede der mittleren Strahlungseigenschaften des Kondensstreifens zwischen Modellergebnissen für horizontal gemittelte mikrophysikalische Eigenschaften und der vollen 2D Strahlungslösung aufzuzeigen wurden vergleichende Strahlungstransportrechnungen durchgeführt. Abb. 14 zeigt die diffusen auf- und abwärtsgerichteten Strahlungsflußdichten direkt über und unter dem simulierten Kondensstreifen im sichtbaren Spektralbereich ($0,2 - 0,7 \mu m$) gerechnet für eine im Zenit stehende Sonne. Durchgezogene Linien kennzeichnen die IPA und gestrichelte Linien kennzeichnen die 2D Lösung. Die Strahlungsflußdichten sind lokal stark modifiziert wenn der horizontale Strahlungstransport vernachlässigt wird. Die zweidimensio-

nale Lösung zeichnet sich hingegen durch einen wesentlich glatteren Verlauf aus. Weiterhin ist auffällig, daß der reflektierte Anteil der 2D Lösung systematisch kleiner ist als der den man unter Verwendung der IPA erhält.

Zeit [min]	$\langle \delta \rangle$	δ_{max}
4	0,32	0,60
30	0,38	0,64
30a	0,48	1,00
30b	1,30	3,90
30c	2,30	7,60

30 a - c sind die willkürlich gealterten Kondensstreifen.

Tabelle 7: Horizontal gemittelte und maximale optische Dicke im sichtbaren Spektralbereich (0,2 - 0,7 μm).

Um diese Systematik weiter als Funktion der mittleren optischen Dicke des Kondensstreifens sowie des Sonnenzenitwinkels zu untersuchen, wurde die mittlere optische Dicke für das sechste Entwicklungsstadium des Kondensstreifens willkürlich erhöht, die räumliche Struktur der Extinktion aber konstant gehalten (Fälle 30a - c in Tabelle 7). Dieses Vorgehen mag kritisch sein, aber eine mittlere optische Dicke von zwei ist nicht total unrealistisch für einen gealterten Kondensstreifen. Nötig wurde dieses Vorgehen durch die Tatsache, daß die Entwicklung des Kondensstreifens mit dem GSM nicht weiter gerechnet werden konnte, weil das dreidimensionale Gitter aus rechentechnischen Gründen nicht größer dimensioniert werden konnte.

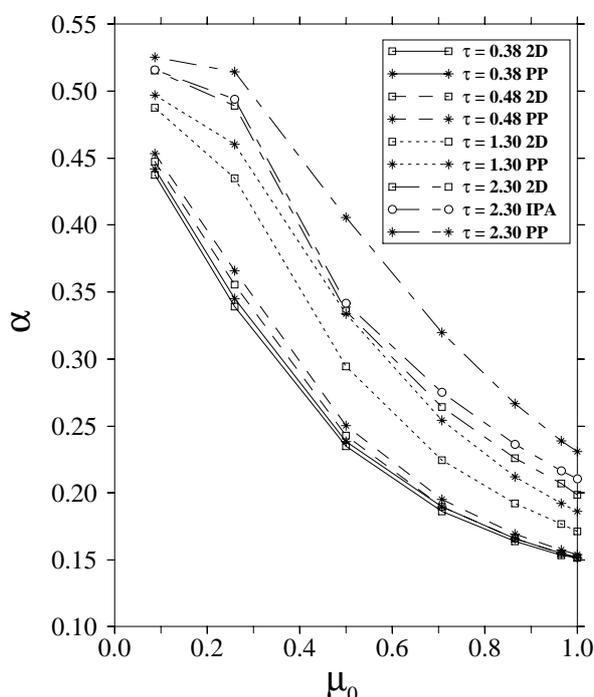


Abb.15: Horizontal gemittelte Wolkenalbedo im sichtbaren Spektralbereich (0,2 - 0,7 μm) als Funktion des Kosinus des Sonnenzenitwinkels für verschiedene mittlere optische Dicken (Tabelle 7).

Abb. 15 zeigt die horizontal gemittelte Wolkenalbedo als Funktion des Sonnenzenitwinkels für die Fälle 30, 30a, 30b und 30c aus Tabelle 7. Die Albedo zeigt den erwarteten Anstieg mit wachsendem Sonnenzenitwinkel für alle optischen Dicken. Unterschiede in der Albedo zwischen homogenen und inhomogenen Bedingungen bleiben klein für die realistische optische Dicke nach 30 Minuten Simulationszeit. Für die willkürlich gealterten Kondensstreifen mit höheren optischen Dicken werden größere Differenzen erreicht, wobei die Albedo für horizontal homogene Verhältnisse immer größer ist als der korrespondierende Wert für inhomogene Verhältnisse. Beachtet man die Tatsache, daß die Absorption in diesem Spektralbereich sehr klein ist, kann vermutet werden, daß die Transmission in diesem Spektralbereich bei Verwendung einer planparallelen Approximation für horizontal gemittelte mikrophysikalische Eigenschaften unterschätzt wird. Zusätzlich ist in Abb. 15 für den Fall 30c noch die horizontal gemittelte Albedo für die IPA eingezeichnet. Die Differenz zwischen IPA und 2D Lösung ist sehr viel geringer als die zwischen IPA und planparalleler Rechnung. Dies bedeutet, daß die Vernachlässigung des horizontalen Strahlungstransports keinen sehr großen Fehler in der Albedo verursacht. Ähnliche Ergebnisse wurden z.B. von CHAMBERS et al. (1997) auch für maritime Stratocumuluswolken gefunden.

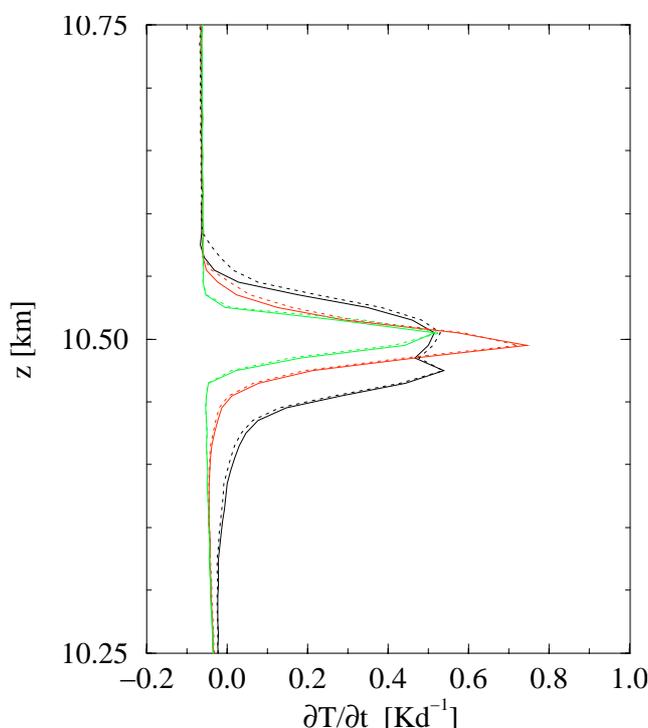


Abb.16: Horizontal gemittelte Profile der Abkühlungsrate im Infraroten nach 4 (grün), 14 (rot) und 30 Minuten (schwarz) Simulationszeit. Durchgezogene Linie: IPA; gestrichelte Linie: 2D Lösung.

Interessant für einen eventuellen Einfluß der Strahlung auf die Dynamik des Kondensstreifens war die Untersuchung der durch die Strahlung verursachten lokalen Erwärmung oder Abkühlung. Bei der Berechnung der lokalen Änderung der Temperatur ergab sich, daß diese im Infraroten stärker als im solaren Spektralbereich ist. Abb. 16 zeigt die horizontal gemittelten Profile der lokalen Temperaturänderung im terrestrischen Spektralbereich nach 4 (grün), 14 (rot) und 30 Minuten (schwarz) Simulationszeit. Die durchgezogenen Linien geben die Ergebnisse der IPA und die gestrichelten Linien die 2D Lösung wieder. Während aller Entwicklungsstadien ist eine kleine Erwärmung im unteren Bereich des Kondensstreifens feststellbar, während am Wolkenoberrand keine starke Abkühlung stattfindet. Die Erwärmung verlagert sich im Laufe der Zeit in etwas tiefere Schichten. Die maximalen Werte sind aber so klein, daß die Strahlung keine bedeutende Energiequelle für die turbulente kinetische Energie darstellt.

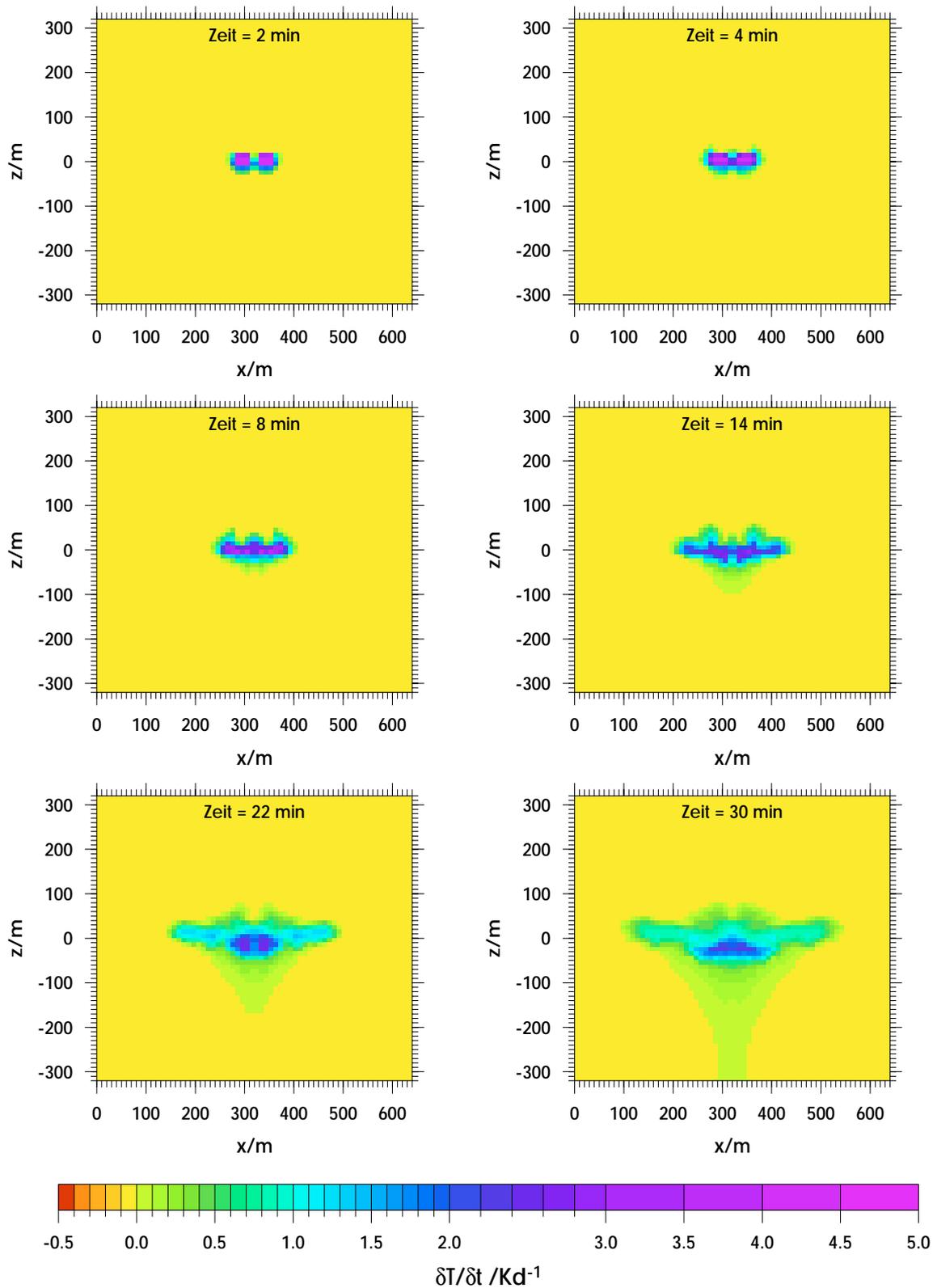


Abb.17: Abkühlungsrate für den gesamten infraroten Spektralbereich für sechs Entwicklungsstadien (2, 4, 8, 14, 22 und 30 Minuten) eines Kondensstreifens simuliert mit dem GSM.

Weiterhin sind die Unterschiede zwischen IPA und 2D Lösung im horizontalen Mittel wie bei der Albedo im Solaren marginal. Um die Struktur der Erwärmung aufzuzeigen sind in Abb. 17 Vertikalschnitte der lokalen Temperaturänderungen für alle sechs Entwicklungsstadien des Kondensstreifens dargestellt. Zu erkennen ist, daß die maximale Erwärmung mit Werten von ca. 5 Kd^{-1} nach zwei Minuten und von $2,8 \text{ Kd}^{-1}$ nach 30 Minuten in dem Gebiet der Wolke, in dem sich die kleinen Teilchen ($r_{eff} = 2 - 4 \mu\text{m}$) mit Anzahldichten von $10^7 - 10^8 \text{ kg}^{-1}$ befinden, anzutreffen ist. In den äußeren Bereichen werden hingegen maximal Werte von nur 1 Kd^{-1} erreicht.

5. Zusammenfassung

Auf der Grundlage eines Grobstruktursimulationsmodells (GSM) wurden die Mikrophysik, die Dynamik und die Strahlungseigenschaften von Kondensstreifen untersucht. Die Ergebnisse dieser Modellstudien wurden zum einen dazu benutzt, die Empfindlichkeit der Kondensstreifeneigenschaften im Hinblick auf externe Umgebungsbedingungen zu evaluieren.

Darüber hinaus wurde versucht, die Ergebnisse des GSM zu validieren. Durch einen Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Eigenschaften von Kondensstreifen sollte Aufschluß darüber erhalten werden, ob die atmosphärischen Zustandsgrößen und die zeitliche Entwicklung von Kondensstreifen durch das Modell richtig wiedergegeben wird.

Schließlich wurde herausgearbeitet, welchen Einfluß die Form der Eispartikel auf die Kondensstreifenentwicklung ausübt. Basierend auf diesen Untersuchungen konnten folgende Resultate und Schlußfolgerungen abgeleitet werden:

1. Das GSM reproduziert die gemessene Entwicklung der Partikelspektren.
2. Die Größe der Eispartikel im Kondensstreifen variiert im Bereich von $5 - 10 \mu\text{m}$. Die Größe der Eispartikel im Kondensstreifen ist demnach deutlich kleiner als in natürlichen Cirren.
3. Die optischen Dicken der simulierten Kondensstreifen weisen nach einer Simulationszeit von 50 Minuten Werte im Bereich von 0.3 bis 0.5 auf.
4. Der Wolkenalbedobias für die hier simulierten Kondensstreifen kann vernachlässigt werden. Erst bei optischen Dicken größer als eins ist ein signifikanter Bias festzustellen.
5. Die berechneten Werte der horizontalen Diffusionskoeffizienten der simulierten Kondensstreifen befinden sich in Übereinstimmung mit experimentellen Befunden.
6. Die Form der Eispartikel übt einen merklichen, jedoch - verglichen mit externen Einflußgrößen (z.B. der relativen Feuchte) - geringen Einfluß auf die Kondensstreifenentwicklung aus.
7. Die entwickelten Strahlungstransportmodelle sind in der Lage das dreidimensionale Strahlungsfeld monochromatisch und breitbandig zu berechnen.
8. Für die Berechnung von dreidimensionalen Feldern der Strahlungsflußdichte in Atmosphären mit Wolken im solaren Spektralbereich ist eine moderate Winkelauflösung mit 8 zenitalen sowie 16 azimutalen Stützstellen erforderlich.

6. Literatur

Appleman, H. (1953): The formation of exhaust condensation trails by jet aircraft, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **34**, 14 - 20.

Bakan, S., M. Betancor, V. Gayler and H. Graßl (1994): Contrail frequency over Europe from NOAA-satellite images., *Ann. Geophys.*, **12**, 962-968.

Beard, K. V. (1976): Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 851 - 864.

Boin, M. and Levkov, L. (1994): A numerical study of contrail development, *Ann. Geophys.*, **12**, 969-978.

Chambers, L. H., B. A. Wielicki, and K. F. Evans (1997): Independent Pixel and Two-Dimensional Estimates of Landsat-Derived Cloud Field Albedo. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1525 - 1532.

Chlond, A. (1998): Large - Eddy Simulation of contrails, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 796 -819.

Dürbeck, T. (1997): Grobstruktursimulation von Mischungsprozessen in der freien Atmosphäre, *DLR Forschungsbericht*, **97-02**, 96 Seiten.

Evans, K. F. (1998): The Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method for Three-dimensional Atmospheric radiative Transfer. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 429-466.

Fortuin, I. P. F., R. van Dorland, W. M. F. Wauben and H. Kelder (1995): Greenhouse effects of aircraft emissions as calculated by a radiative transfer model, *Ann. Geophys.*, **13**, 413 - 418.

Fu, Q. und K. N. Liou (1992): On the Correlated k-Distribution Method for radiative Transfer in Nonhomogeneous Atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139-2156.

Gayet, J. F., G. Febvre, G. Brogniez, H. Chepper, W. Renger and P. Wendling (1996): Microphysical and optical properties of cirrus and contrails: cloud field study on 13 October 1989, *J. Atmos. Sci.*, **53**, 126 - 138.

Gerz, T. and Ehret, T. (1996): Wake dynamics and exhaust distribution behind cruising aircraft, *DLR, Institut für Physik der Atmosphäre*, Report No. **58**, 12 Seiten.

Gierens, K. M. (1993): A Fast Six-Flux Radiative Transfer Method for Application in Finite Cloud Models. *Cont. Atmos. Phys.*, **66**, 73-87.

Gierens, K. M. (1996): Numerical simulations of persistent contrails, *J. Atmos. Sci.*, **53**, 3333 - 3348.

Graßl, H. (1990): Possible climatic effects of contrails and additional water vapour. In: U. Schumann (ed.): Air traffic and the Environment, *Lect. Notes in Engrg.*, **Vol. 60**, Springer, Berlin, 124 - 137.

Hollweg, H.-D. (1993): A k-Distribution Method Considering Centres and wings of Atmospheric Absorption Lines. *J. Geophys. Res.*, **98**, 2747-2756.

Jäger, H., V. Freudenthaler and F. Homburg (1997): Remote sensing of optical depth of aerosols and cloud cover related to air traffic, *Atmos. Environ.*, im Druck.

Liou, K. N., S. C. Ou and G. Koenig (1990): An investigation of the climatic effect of contrail cirrus, In: U. Schumann (ed.): Air traffic and the Environment, *Lect. Notes in Engrg.*, **Vol. 60**, Springer, Berlin, 154 - 169.

Lovejoy, S., A. Davis, P. Gabriel, D. Schertzer und G. L. Austin (1990): Discrete Angle Radiative Transfer 1. Scaling and Similarity, Universality and Diffusion. *J. Geophys. Res.*, **95**, 11699-11715.

Minnis, P., J. K. Ayers and D. R. Doelling (1997): Contrails Over the U. S. and Their Potential Impact on the Radiation Budget. *Proceedings: Impact of Aircraft Emissions upon the Atmosphere*, **Volume I**, 355-360.

Ponater, M., S. Brinkop, R. Sausen and U. Schumann (1996): Simulating the global atmospheric response to aircraft water vapour emissions and contrails - a first approach using a GCM, *Ann. Geophysicae*, **14**, 941 - 960.

Pruppacher, H. and Klett, J. (1997): Microphysics of Clouds and Precipitation, *Kluwer Academic Publishers*, 954 Seiten.

Rind, D., P. Lonergan and K. Shah (1996): Climatic effect of water vapour release in the upper troposphere, *J. Geophys. Res.*, **101** (D23), 29395 - 29405.

Sausen, R., K. Gierens, M. Ponater and U. Schumann (1998): A diagnostic study of the global coverage by contrails. Part I: Present day climate (rev. version), *DLR - Report*, **Nr. 89**, 25 Seiten.

Schumann, U., P. Konopka, R. Baumann, R. Busen, T. Gerz, H. Schlager, P. Schulte and H. Volkert (1995): Estimation of diffusion parameters of aircraft exhaust plumes near the tropopause from nitric oxide and turbulence measurements, *J. Geophys. Res.*, **100**, D7, 14147-14162.

Schumann, U., A. Chlond, Ebel, B. Kärcher, H. Pak, H. Schlager, A. Schmitt and P. Wendling (eds.) (1997): Pollutants from air traffic - Results of atmospheric research 1992 - 1997, *DLR Mitteilung*, **97-04**, 291 S.

Starr, D. O'C. and Cox, S.K. (1985): Cirrus clouds. Part I: Cirrus cloud model, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 2663 - 2681.

Stephens, G. L. (1980): Radiative Transfer on a Linear Lattice: Application to Anisotropic Ice Crystal Clouds. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2095-2104.

Strauss, B. und P. Wendling (1997): Microphysical Properties of Contrails and Natural Cirrus Clouds. *Proceedings: Impact of Aircraft Emissions upon the Atmosphere*, **Volume I**, 155-158.

Wendling, P., R. Büll, M. Kästner, H. Mannstein, R. Meyer, F. Schröder und B. Strauss (1997): Bestimmung klimarelevanter Eigenschaften von Kondensstreifen aus Satellitenmessungen, *Abschlußbericht zum Forschungsprojekt AP 1311, DLR*, 77 Seiten.

Wiscombe, W. (1977): The delta-M Method: Rapid yet Accurate Radiative Flux Calculations for Strongly Asymmetric Phase Functions. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1408-1422.

6.1 Veröffentlichungen

Chlond, A. (1998): Large - Eddy - Simulation of contrails, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 796 -819.

Chlond, A. und Schulz, J. (1997): LES and radiative properties of contrails, *DLR, Mitteilungen 97-04*, 215 - 224.

Schulz, J. (1996): Radiative transfer in clouds with arbitrary internal inhomogenities, in: Smith, W. L. and Stamnes, K.: Current problems in atmospheric radiation, *Proceedings of the IRS, Fairbanks, Alaska, 19. - 24. August 1996*, 246 - 249.

Schulz, J. (1998): On the effect of cloud inhomogenities on area averaged properties of contrails. *Geophys. Res. Letters*, **25**, 1427-1430.