

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden Flugzeugmessungen von Cirruswolken, die im Rahmen mehrerer Kampagnen in unterschiedlichen Regionen durchgeführt wurden, auf Inhomogenitäten bezüglich mikrophysikalischer Parameter wie z.B. Eiswassergehalt und effektiver Radius untersucht. Der Einfluss dieser Inhomogenitäten für die Berechnung des solaren Strahlungstransports durch Cirren wird mit einem 3-dimensionalen Strahlungstransportmodell nach dem Monte-Carlo-Prinzip ermittelt. Dazu werden aus den zur Verfügung stehenden Flugzeugmessungen 2-dimensionale Felder von Extinktionskoeffizient, Phasenfunktion und Einfachstreueralbedo als Eingabedaten für die Strahlungstransportberechnung abgeleitet. Die Ergebnisse der Strahlungstransportberechnung für die heterogene Wolke, wie aus den Flugzeugmessungen ableitbar, werden mit den Ergebnissen einer homogenen Wolke verglichen, wie sie sich durch Mittelung der heterogenen Felder für Extinktionskoeffizient, Phasenfunktion und Einfachstreueralbedo ergibt. Die relative Differenz dieser Rechnungen ergibt den relativen Fehler, wie er durch die homogene Betrachtungsweise der jeweiligen Cirruswolke in Klimamodellen entstehen würde.

Die Ergebnisse der Strahlungstransportmodellierung für 11 einzelne Fallstudien zeigen im Vergleich zwischen heterogener und homogener Betrachtungsweise der Wolke relative Fehler in den Strahlungsgrößen der solaren Strahlungsflussdichten und Absorption von maximal $\pm 30\%$ im Falle extremer Inhomogenität. Für die übrigen betrachteten Fälle ergeben sich mittlere relative Fehler um $\pm 10\%$. Dabei zeigt sich eine deutliche betragsmäßige Zunahme der relativen Fehler mit steigender relativer Varianz der optischen Dicke. Eine deutliche Abhängigkeit der relativen Fehler von der mittleren optischen Dicke der Wolke ist nicht zu erkennen. Dennoch liegen die relativen Fehler der Strahlungsgrößen bei einer homogenen Betrachtungsweise für Cirren mit mittleren optischen Dicken $\tau < 6$ und relativen Varianzen $V(\tau) < 0.2$ stets unterhalb $\pm 10\%$. Dies ist insbesondere für Cirren in den mittleren Breiten der Fall, wie sie im Zusammenhang mit frontalen Systemen, durch Leewellenbildung hinter orografischen Hindernissen, oder durch Hebung im

Bereich von Strahlströmen entstehen. Diese Cirren kennzeichnen sich im Allgemeinen durch geringe optische Dicken von 0.5 - 8 aus und sind mit relativen Varianzen $V(\tau)$ von 0.05 - 0.15 vergleichsweise homogen. Für tropische Cirren, wie sie im Zusammenhang mit stark konvektiven Systemen im Amboss von Cumulonimben auftreten können, ergeben sich teilweise in den Strahlungsgrößen größere Fehler durch die homogene Betrachtungsweise, da hier mittlere optische Dicken von $\tau = 20$ und relative Varianzen $V(\tau) > 1$ erreicht werden können.

Für einen reflektierenden Erdboden mit einer Bodenalbedo $\alpha = 0.3$ ergibt sich eine Verringerung der relativen Fehler durch die homogene Betrachtungsweise, da Inhomogenitäten innerhalb der Wolken durch das mehrfache Hin- und Herreflektieren der Strahlung zwischen Wolke und Erdboden ausgeglichen werden.

Bei der Betrachtung schematischer Wolken stellt sich heraus, dass die relativen Fehler der Strahlungsgrößen durch die homogene Betrachtungsweise unabhängig sind von der horizontalen Skala innerhalb welcher Inhomogenitäten auftreten. Lediglich die Varianz um den Mittelwert ist entscheidend. Vertikale Inhomogenitäten haben auf Grund des geringen Horizontaltransports in Cirren bei den hier betrachteten Fallstudien keinen Einfluss. Säulenunabhängige Rechnungen (IPA) liefern dieselben Mittelwerte der Strahlungsgrößen wie Rechnungen, die den horizontalen Transport zwischen Modellsäulen zulassen. Fehler der Strahlungsgrößen durch die homogene Betrachtungsweise sind unabhängig von Inhomogenitäten des effektiven Radius oder der dominierenden Partikelform innerhalb der Wolke, wonach sich Phasenfunktion und Einfachstreueralbedo bestimmen, hier sind lediglich korrekte Mittelwerte von Bedeutung. Die Fehler der Strahlungsgrößen durch die homogene Betrachtungsweise sind zum überwiegenden Teil durch Inhomogenitäten der optischen Dicke bedingt. Eine Abhängigkeit vom Sonnenzenithwinkel konnte nicht festgestellt werden.

Für Cirren größerer optischer Dicke und höherer relativer Varianz $V(\tau)$ wird ein einfaches Korrekturverfahren entwickelt, das die mittlere optische Dicke entsprechend ihrer relativen Varianz $V(\tau)$ nach unten korrigiert, so dass weiterhin eine homogene Betrachtungsweise der Wolke möglich ist, ohne Fehler bei der Strahlungstransportrechnung zu erzeugen. Dazu muss die horizontale Verteilung der optischen Dicke bekannt sein. Die so korrigierten Strahlungsgrößen stimmen zu $\pm 10\%$ mit den Ergebnissen der heterogenen Berechnung überein. Insbesondere der relative Fehler der gesamten abwärts gerichteten Strahlungsflussdichte, die in Klimamodellen für eine richtige Energiebilanz am Erdboden entscheidend ist, reduziert sich zu maximal -7% .

Insgesamt ergibt die vorliegende Arbeit, dass horizontale sowie vertikale Inhomoge-

nitäten in großskalig induzierten Cirren der mittleren Breiten bei Strahlungstransportrechnungen vernachlässigt werden können, falls die mittlere optische Dicke kleiner als 6 ist. Die zu erwartenden Fehler in den solaren Strahlungsflussdichten und der Absorption sind kleiner als $\pm 10\%$. Dies gilt unabhängig von Sonnenzenithwinkel und Bodenreflektivität. Für tropische Cirren, die im Zusammenhang mit konvektiven Systemen entstehen und größere optische Dicken aufweisen, müssen Inhomogenitäten bei Strahlungstransportrechnungen berücksichtigt werden. Hierfür wurde ein Korrekturverfahren entwickelt, das unter Kenntnis der horizontalen Verteilung der optischen Dicke in etwa 2 km Auflösung, eine homogene Berechnung des solaren Strahlungstransports durch die Wolke bei deutlich reduzierten Fehlern ermöglicht. Die Anwendung dieses Korrekturverfahrens ist nun für die Strahlungstransportberechnung von Cirren in Klimamodellen zu prüfen.

Zur Charakterisierung von Inhomogenitäten in Cirren standen für diese Studie nur großskalig induzierte Cirren aus mittleren Breiten und tropische Cirren konvektiver Systeme zur Verfügung. Aussagen über den Einfluss von Inhomogenitäten in Cirren auf den Strahlungshaushalt, die hier nach geografischer Breite unterschieden wurden, können daher ebenso in Abhängigkeit vom Entstehungsmechanismus verstanden werden. Die Untersuchung von Cirren im Bereich von Cumulonimben in mittleren Breiten und tropischen Cirren, die im Zusammenhang mit großräumiger Hebung stehen, ist nötig, um die Abhängigkeit eindeutig zu bestimmen. Die für Mai 2003 geplante Satellitenmission CloudSat wird Informationen über Wolkenfelder mit einer vertikalen und horizontalen Auflösung von bis zu 1.5 km liefern. Die Erstellung einer globalen Klassifizierung von Inhomogenitäten in Cirren wird mit Hilfe dieser Daten möglich sein. Die Implementierung einer Parameterisierung zur Berücksichtigung von Wolkeninhomogenitäten in Klimamodellen ist im Rahmen des EU-Projekts 4DWolken geplant.