

Multiple scattering and absorption of solar radiation in the presence of three-dimensional cloud fields

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades des
Doktors der Naturwissenschaften
am Fachbereich Geowissenschaften
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Marc Schröder

geboren am 23.12.1971 in Damme

Berlin, Juli 2004

1. Gutachter: Prof. Dr. Jürgen Fischer
2. Gutachter: Prof. Dr. Ralf Bennartz

Tag der Disputation: 16. August 2004

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe verfasst und nur die angegebene Literatur und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Marc Schröder
27. Juli 2004

Curriculum vitae

Geburtsdatum:	23.12.1971 in Damme
Familienstand:	ledig
1978 - 1982:	Grundschule Damme
1982 - 1984:	Orientierungsstufe Damme
1984 - 1991:	Gymnasium Damme
Sep. 1991 - Ok. 1992:	Rettungsdienst beim Malteserhilfsdienst
1992 - 1999:	Studium der Physik an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
1995 - 1997:	Studium Mariner Umweltwissenschaften an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Juli 1999:	Diplom im Fach Physik
Dez. 1999 - Jan. 2000:	Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei dem DLR in Berlin
Apr. 2000 - März 2001:	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der FU Berlin, AG Fischer
Apr. 2001 - Mai 2004:	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der FU Berlin, AG Fischer. Vorbereitung der Dissertation
seit Juni 2004:	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der FU Berlin, AG Fischer

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit hat unter anderem zum Ziel, das Verständnis von Mehrfachstreuung und Absorption in der bewölkten Atmosphäre zu verbessern. Zu diesem Zweck wird eine umfangreiche Diskussion des Einflusses der dreidimensionalen (3d) Struktur von Wolken auf die solare Strahlung präsentiert. Die Untersuchungen basieren auf 3d Strahlungstransportrechnungen und auf Daten, die während einer Messkampagne gewonnen wurden. Nachdem eine Einführung in grundlegende Theorien und Methoden gegeben wurde, werden die eingesetzten Messgeräte und die Messkampagne vorgestellt. Eine räumlich hochaufgelöste Wolkenmaske wurde in diesem Zusammenhang entwickelt. Diese wird für eine spätere Vorprozessierung der Daten benötigt. Die Strahlungstransportrechnungen werden mit einem Monte Carlo Modell durchgeführt. Zunächst wird eine spezielle Methode vorgestellt, um das Verhältnis von Signal und Rauschen zu verbessern. Anschliessend wird das Strahlungstransportmodell durch Vergleich mit anderen Modellen validiert. Um das Strahlungstransportmodell mit Eingabefeldern zu versorgen, wurde ein Wolkengenerator auf Basis von Fouriertransformationen entwickelt. Die so bereitgestellten Felder werden zur Charakterisierung des Rauschverhaltens des Modells herangezogen. Zwei weitere Methoden zur Wolkengenerierung werden vorgestellt: sogenannte "iterative amplitude adapted Fourier transform" Surrogaten und ein "large eddy simulation" Modell. Da die bisher genannten Modelle vornehmlich die geometrische Struktur bzw. den Flüssigwassergehalt liefern, werden im weiteren mikrophysikalische Eigenschaften diskutiert und ein spezielles Mischungsschema eingeführt.

Zwei grundlegende Aspekte des Einflusses von 3d Wolkenstrukturen auf solaren Strahlungstransport werden untersucht: Strahlungsglättung und Effekte durch räumliches Mitteln. Die Strahlungsglättung wird untersucht, indem die sogenannte "power spectrum" Analyse auf Messungen und Simulationen angewandt wird. Die Analyse konzentriert sich auf den Einfluss von Gasabsorption, Bodenalbeden und Zweischichtwolken. In dieser Arbeit werden die Ausdrücke groß- und kleinskalige Strahlungsglättung eingeführt, welches eine Erweiterung des sonst üblichen Begriffes darstellt und die Skalenabhängigkeit der Einflüsse betont. Große Bodenalbeden führen selbst bei vollständiger Bedeckung zu signifikanter, großskaliger Strahlungsglättung. Das spektrale Verhalten von Zweischichtwolken resultierte in vergleichbaren Ergebnissen und ist im Rahmen dieser Arbeit erstmalig untersucht worden. Absorption beeinflusst groß- und kleinskalige Strahlungsglättung. Insbesondere verringert sie den horizontalen Photonentransport und damit den Skalenbruch (Übergang von groß- zu kleinskaligen Effekten). Die anhand von Messungen gewonnenen Ergebnisse werden anschliessend mittels der Simulationsergebnisse erfolgreich verifiziert.

Der Einfluss von räumlichem Mitteln auf die Nadirstrahldichte und Wolkenableitungsverfahren wird ebenfalls auf Basis von hochaufgelösten Messungen und Simulationen untersucht. Die Analysen zum Einfluss von horizontalem Mitteln zeigen, dass bei unterschiedlichen Auflösungen das Angleichen durch Mitteln unbedingt durch eine exakte Übereinstimmung der Position begleitet sein muss. Der Untersuchung des Einflusses von vertikaler Schichtung auf die Nadirstrahldichte folgt eine Parameterisierung der mittleren Photonenweglänge mit der optischen Dicke und dem Effektivradius. Ersteres zeigt, dass die Intensität der Absorption und die Volumenextinktion an der Wolkenoberseite die beherrschenden Parameter sind. Die zweite Analyse offenbart, dass die Abhängigkeit der mittleren Photonenweglänge vom Effektivradius signifikant ist. Die erweiterte Parameterisierung öffnet Möglichkeiten zur Verbesserung von Ableitungsverfahren und der Einbindung von Gasabsorption in globalen Zirkulationsmodellen.

Abstract

The central subject of this work is to improve the understanding of multiple scattering and absorption in the presence of 3d cloud fields. A systematic investigation of the effect of 3d cloud structure on the atmospheric radiation field is carried out. The investigations are based on (3d) radiative transfer simulations and observations taken during a measurement campaign. After the introduction of basic theory and methods, the utilised instruments and the measurement campaign are presented. In this context, a spatial high-resolution cloudmask was developed. The cloudmask is needed for data preprocessing. The radiative transfer is computed with a Monte Carlo model. First, a method to reduce the signal-to-noise ratio is introduced, and second, the validation of the model against other radiative transport models was successfully carried out. To provide the radiative transport model with input fields, a cloud generator based on Fourier transformations was developed. The so generated input fields are used to characterise the noise behaviour of the model. Two other cloud generators are introduced: so called iterative amplitude adapted Fourier transform surrogates and large eddy simulation models. These models either produce the cloud geometry or the liquid water content. Therefore, microphysical properties are discussed in the following, and a special mixing scheme is developed.

The discussion of the effect of 3d cloud structure on solar radiative transport focuses on cloud radiative smoothing and the analysis of spatial averaging. The effect of gas absorption, surface albedo, and two layer clouds on cloud radiative smoothing is investigated by applying the power spectrum analysis to observed and simulated nadir radiances. In this work the terms large and small scale cloud radiative smoothing are introduced, which marks an extension of the usually used term and emphasises the scale dependence of the effects. Even in completely overcasted cases large surface albedos result in significant large scale cloud radiative smoothing. The spectral behaviour of two layer clouds causes comparable findings and is analysed for the first time. Absorption influences large and small scale radiative smoothing. In particular, it reduces horizontal photon transport and the scale break (transition between large and small scale effects). The results from the observations and the computations are in excellent agreement.

The effect of spatial averaging on the nadir radiance and the retrieval of cloud properties is also based on observations and simulations. The analysis of the effect of spatial averaging showed, that in case of different resolutions a simple adjustment through averaging should be accompanied by an exact allocation of both measurements. The investigation of the effect of vertical layering on the nadir radiance is followed by a parameterisation of the mean photon path length with optical thickness and effective radius. The former reveals that the intensity of the absorption and the volume extinction at cloud top are the dominant dependencies. The second analysis demonstrates that the dependence of the mean photon path length on the effective radius is significant. The parameterisation offers a way to improve retrieval schemes and computation of gas absorption in GCMs.

Contents

Introduction	3
Chapter 1. Fundamentals	6
1.1. Radiative transfer and inherent optical properties	6
1.2. Power spectrum analysis	7
1.3. Plane-parallel bias and horizontal photon transport	9
Chapter 2. Airborne remote sensing measurements	12
2.1. The airborne research platform of the Institute of Space Sciences	12
2.1.1. The compact airborne spectrographic imager	12
2.1.2. FUBISS: Free University Berlin's Integrated Spectrographic System	15
2.2. The Baltex Bridge Cloud (BBC) campaign	17
2.3. Generating cloudmasks in spatial high-resolution observations	20
Chapter 3. Artificial cloud generation	24
3.1. Fourier clouds	24
3.2. Surrogate clouds	25
3.3. Large eddy simulations	26
3.4. The adiabatic microphysical model	26
3.5. Mixing scheme	28
Chapter 4. Three-dimensional radiative transfer simulations	31
4.1. Classical Monte Carlo methods and local estimates	31
4.2. The equivalence theorem	35
4.3. Uncertainty estimation of the <i>classical Monte Carlo model</i>	35
4.4. Representativity of a single cloud realisation	36
4.5. Validation of the <i>local estimate model</i>	36
Chapter 5. Cloud radiative smoothing	40
5.1. Data preprocessing and choice of parameters	40
5.2. Surface albedo effects	42
5.3. Impact of gas absorption: large and small scale cloud radiative smoothing	47
5.4. Difference between single and two layer cloud impacts	52
Chapter 6. Effect of horizontal and vertical averaging and layering on retrieval schemes of cloud properties	57
6.1. Vertical layering effects on nadir reflectances	57
6.2. Horizontal averaging effects in measured and simulated remote sensing fields	63
6.3. Parameterisation of mean photon path length	68
Summary	72
Acknowledgements	76
List of Figures	77
List of Tables	82

Bibliography

83