

---

The SARTre Model  
for Radiative Transfer in Spherical Atmospheres  
and its Application to the  
Derivation of Cirrus Cloud Properties

---

DISSERTATION

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

vorgelegt von

JANA MENDROK

Berlin, Juni 2006



1. Gutachter: Prof. Dr. Jürgen Fischer
2. Gutachter: Prof. Dr. Thomas Trautmann

Tag der Disputation: 23. Juni 2006



# Lebenslauf

Name: Jana Mendrok

Geburtsdatum: 22. Juli 1976

Geburtsort: Lauchhammer

  

1983 – 1991: Polytechnische Oberschule “Adolf Hennecke” Senftenberg

1991 – 1996: Gymnasium Senftenberg

1996 – 2002: Studium der Geodäsie, Technische Universität Dresden  
Vertiefung in Photogrammetrie/Fernerkundung und  
Planetare Geodäsie/Geodynamik

März 2002: Diplom im Fach Geodäsie

Mai 2002 – Dez. 2005: Doktorandin am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Methodik der Fernerkundung



# Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das Strahlungstransfermodell SARTre ([Approximate] Spherical Atmospheric Radiative Transfer model) vorgestellt. SARTre wurde entwickelt mit dem Ziel, ein konsistentes Modell zur Simulation von Strahlungstransfer unter Einbeziehung emittierter und gestreuter Strahlung aus terrestrischen und solaren Quellen zur Verfügung zu stellen. Soweit bekannt, ist es das erste Modell, welches fähig ist, Limb-Beobachtungen im Bereich ultravioletter, sichtbarer und infraroter Strahlung sowie im Mikrowellenbereich zu modellieren.

Das Modell wird in seiner Struktur beschrieben und die wesentlichen Ansätze zur Lösung des Strahlungstransferproblems in sphärischer Atmosphäre dargelegt. Insbesondere wird auf die Annahme lokaler Planparallelität der Erdatmosphäre eingegangen, welche die Grundlage zur Berechnung des Beitrages aus Mehrfachstreuung darstellt.

Verifikation und Validierung des Modells SARTre werden beschrieben und die Ergebnisse diskutiert. Die Verifikation erfolgt getrennt für die Bereiche des terrestrischen und solaren Strahlungstransfers jeweils durch Modellvergleich. Zunächst werden Infrarot-Limb-Spektren der Modelle MIRART, KOPRA und ARTS mit Modellierungsergebnissen von SARTre verglichen. Die Simulationen wurden sowohl unter Bedingungen einer klaren, wolkenfreien Atmosphäre sowie für das Auftreten von Eiswolken im Sichtfeld durchgeführt. Die Gültigkeit der Annahme einer lokal planparallelen Atmosphäre im Fall von Mehrfachstreuung wird durch einen Vergleich von mit SARTre und ARTS simulierten Strahlungsfeldern in und um eine Wolke herum geprüft. Sehr gute Übereinstimmung mit den vollsphärischen Lösungen des Modelles ARTS werden für Eiswolken mit einer optischen Dicke von  $\tau > 0.1$  erzielt. Im Falle subsichtbarer Wolken treten Abweichungen bis zu 10 % auf.

Die Verifikation des Modells hinsichtlich solarem Strahlungstransfer erfolgt durch Vergleich simulierter Limb-Beobachtungen im ultravioletten Spektralbereich, der durch starke Rayleigh-Streuung sowie z.T. starke Ozonabsorption gekennzeichnet ist. Als Referenz wird das Monte Carlo Modell McSCIA herangezogen. Durch SARTre und McSCIA berechnete Beiträge von Einfachstreuvorgängen differieren lediglich im Bereich von wenigen Zehntel Prozent. Simulationen unter Berücksichtigung von Mehrfachstreuung weichen um einige Prozent voneinander ab. Gute Ergebnisse werden erzielt, wenn Ozonabsorption dominiert, sowie im Falle einer konservativ streuenden Atmosphäre für Beobachtungen mit Tangentenhöhen unter 25 km. Bei der Modellierung von Limb-Beobachtungen in größeren Tangentenhöhen stößt die pseudo-sphärische Näherung in der Berechnung des Mehrfachstreubeitrags an ihre Grenzen, sobald Streuung in der Atmosphäre dominiert. Dann treten Abweichungen von bis zu 6 % auf.

Die Validierung von SARTre baut auf einer Untersuchung des Effekts von Cirruswolken auf Limb-Emissions-Spektren auf. Simulierte Spektren werden mit MIPAS-Limbmessungen verglichen. Über den simultanen Abgleich von modellierten und gemessenen Spektren zweier aufeinanderfolgender Messungen unterschiedlicher Tangentenhöhe in drei ausgewählten Spek-

tralintervallen zwischen  $825\text{ cm}^{-1}$  und  $1230\text{ cm}^{-1}$  werden Eigenschaften des Cirrus abgeleitet. Es wird demonstriert, dass die von SARTre modellierten Spektren die MIPAS-Messungen gut, d.h. bis in den Bereich der Messgenauigkeit, nachvollziehen können. Dies gilt sowohl für die Kontinuumsbereiche als auch bezüglich der Gasabsorptionslinien. Die Plausibilität der gefundenen Wolkeneigenschaften wird u.a. im Vergleich zu MODIS- und MERIS-Daten diskutiert. Da momentan keine parallel zu MIPAS-Überflügen gemessenen Parameter von Eiswolken existieren, ist die Validierung lediglich indirekt möglich. Die gute Übereinstimmung von Modell und Messung in den über einen breiten Spektralbereich verteilten Fenstern legt jedoch die Korrektheit des Modells nahe, das damit als validiert gelten kann.



# Contents

<b>List of Figures</b>	<b>v</b>
<b>List of Tables</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Fundamentals of Radiative Transfer</b>	<b>5</b>
2.1 The Radiative Transfer Equation . . . . .	5
2.2 Radiative Transfer of Solar and Terrestrial Radiation . . . . .	7
2.3 Radiative Properties of Matter . . . . .	8
2.3.1 Molecular Absorption and Scattering . . . . .	9
2.3.2 Particle Scattering and Absorption . . . . .	12
2.3.3 Radiative Properties of Surfaces . . . . .	15
2.4 Composition and Structure of the Earth's Atmosphere . . . . .	16
2.4.1 Vertical Structure . . . . .	16
2.4.2 Gaseous Constituents . . . . .	17
2.4.3 Aerosols . . . . .	18
2.4.4 Clouds . . . . .	19
2.4.5 The Surface of the Earth . . . . .	21
<b>3 The Radiative Transfer Model SARTre</b>	<b>23</b>
3.1 Basic Principles . . . . .	23
3.1.1 Source Function Integration Technique . . . . .	25
3.1.2 The Sources . . . . .	26
3.1.3 Describing Atmospheric Conditions – The Philosophy of Levels and Layers	28
3.2 Calculating Properties of Molecular Atmospheric Constituents . . . . .	30
3.2.1 Line-by-Line Calculation of Molecular Absorption Cross Sections . . . . .	30
3.2.2 Deriving Molecular Absorption Coefficients . . . . .	31
3.3 Particle Properties . . . . .	31
3.4 Deriving the Multiple Scattering Contribution from DISORT . . . . .	32
3.4.1 The DISORT Package . . . . .	32
3.4.2 Preparation of DISORT Input . . . . .	34
3.4.3 Legendre Expansion of Scattering Phase Function . . . . .	35
3.4.4 Evaluation of the Multiple Scattering Source Term $J_{MS}$ . . . . .	36
3.5 Observational Geometry in Spherical Atmospheres . . . . .	37
3.6 Remarks and Outlook . . . . .	39

<b>4</b>	<b>Verification – Terrestrial RT Intercomparison</b>	<b>41</b>
4.1	Models in the Intercomparison . . . . .	41
4.1.1	MIRART . . . . .	42
4.1.2	KOPRA . . . . .	42
4.1.3	ARTS . . . . .	43
4.2	Intercomparison Setup . . . . .	44
4.2.1	The Spectral Window . . . . .	45
4.2.2	Atmospheric Setup . . . . .	46
4.2.3	The Clouds . . . . .	46
4.3	Case I – Clear-Sky Intercomparison . . . . .	48
4.3.1	Motivation . . . . .	48
4.3.2	Results of the SARTre–MIRART Comparison . . . . .	49
4.3.3	Results of Comparing SARTre to KOPRA and ARTS . . . . .	49
4.4	Case II – Thermal Emission of Clouds . . . . .	51
4.4.1	Motivation . . . . .	51
4.4.2	Results . . . . .	52
4.5	Scattering in SARTre – Internal Tests . . . . .	54
4.5.1	Motivation . . . . .	54
4.5.2	Consistency of Thermal Emission Sources in SARTre and DISORT . . . . .	54
4.5.3	Energy Conservation . . . . .	55
4.6	Case III – Scattering Intercomparison . . . . .	57
4.6.1	Motivation . . . . .	57
4.6.2	Addendum to Intercomparison Setup . . . . .	57
4.6.3	Radiance Fields in a Plane-Parallel Atmosphere . . . . .	58
4.6.4	Radiance Fields in a Spherical Atmosphere . . . . .	59
4.6.5	Limb Radiance Spectra . . . . .	63
4.7	Summary . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Verification – Solar RT Intercomparison</b>	<b>67</b>
5.1	Models in the Intercomparison . . . . .	68
5.1.1	The McSCIA Model . . . . .	68
5.1.2	Further Models . . . . .	68
5.2	Intercomparison Setup of Atmosphere and Geometry . . . . .	69
5.3	The Intercomparison Cases – Results and Interpretation . . . . .	71
5.3.1	Single Scattering Limb Radiances . . . . .	71
5.3.2	Total Scattering Limb Radiances . . . . .	73
5.4	Summary . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Validation – Derivation of Cirrus Properties</b>	<b>79</b>
6.1	The MIPAS Data Set . . . . .	79
6.2	Observation and Simulation of High Altitude Ice Clouds . . . . .	80
6.2.1	Effects of High Clouds to Infrared Spectra . . . . .	80
6.2.2	Placement of Microwindows . . . . .	82
6.2.3	Assumptions in Modeling Ice Clouds . . . . .	83
6.2.4	Macrophysical, Microphysical and Optical Cloud Properties . . . . .	83
6.3	Setup of Atmosphere, Observation Geometry and Sensor . . . . .	86

6.4	Sensitivity Study . . . . .	89
6.4.1	Cloud Optical Thickness . . . . .	90
6.4.2	Cloud Top Height . . . . .	91
6.4.3	Cloud Geometrical Thickness . . . . .	92
6.4.4	Particle Size Distribution . . . . .	93
6.4.5	Crystal Habit . . . . .	95
6.4.6	Cloud Extent and Position . . . . .	98
6.4.7	Tangent Altitude . . . . .	100
6.4.8	Surface Temperature and Emissivity . . . . .	101
6.4.9	Conclusions . . . . .	102
6.5	Retrieval Results . . . . .	104
6.5.1	Discussion . . . . .	105
6.5.2	Conclusions . . . . .	107
<b>7</b>	<b>Summary</b>	<b>109</b>
	<b>List of Acronyms, Symbols, and Indices</b>	<b>111</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>119</b>
	<b>Acknowledgements</b>	<b>127</b>



# List of Figures

2.1	Spectral distribution of solar and terrestrial radiation . . . . .	8
2.2	Scattering geometry . . . . .	11
2.3	Scattering efficiency of Mie particles . . . . .	12
2.4	Mie scattering patterns depending on size parameter . . . . .	13
2.5	Atmospheric structure . . . . .	17
2.6	Effect of ice clouds on limb emission spectra . . . . .	20
2.7	Optical properties of exemplary surfaces . . . . .	21
3.1	Structure of the SARTre model . . . . .	24
3.2	Local planarity in spherical atmospheres . . . . .	28
3.3	Levels and layers in SARTre . . . . .	29
3.4	Extension of 1D cloud geometry . . . . .	38
3.5	Local angles in spherical geometry . . . . .	39
4.1	ARTS cloud box . . . . .	43
4.2	Characteristics of the spectral interval . . . . .	45
4.3	Atmospheric conditions . . . . .	46
4.4	Cloud layer setup – particle number density functions . . . . .	48
4.5	Results of the intercomparison of IR clear-sky radiative transfer . . . . .	50
4.6	Results of the intercomparison of RT calculations for thermal emission by clouds . . . . .	52
4.7	Effects of varied cloud layer setup in SARTre . . . . .	53
4.8	Differences of thermal emission radiances by DISORT and SARTre . . . . .	55
4.9	Differences of ARTS-DOIT and SARTre radiance fields in a plane-parallel atmosphere (1D plot) . . . . .	58
4.10	Differences of ARTS-DOIT and SARTre radiance fields in a plane-parallel atmosphere (2D plot) . . . . .	59
4.11	Differences of ARTS-DOIT and SARTre radiance fields in a spherical atmosphere (1D plot) . . . . .	60
4.12	Differences of ARTS-DOIT and SARTre radiance fields in a spherical atmosphere (2D plot) . . . . .	61
4.13	Differences of ARTS-DOIT and SARTre radiance fields in a spherical atmosphere around horizontal direction . . . . .	62
4.14	Results of the intercomparison of scattering limb spectra . . . . .	64
4.15	Above cloud limb deviations of SARTre and ARTS-DOIT radiance fields . . . . .	65
5.1	Atmospheric optical properties in solar RT intercomparison . . . . .	70

5.2	Single scattering radiance intercomparison results . . . . .	72
5.3	Total scattering radiance results in case of absorbing surface . . . . .	74
5.4	Total scattering radiance results in case of reflecting surface . . . . .	75
6.1	MERIS RGB-composite and cloud mask . . . . .	80
6.2	MIPAS spectra of orbit 7203 . . . . .	81
6.3	Microwindows for sensitivity study and cirrus retrieval . . . . .	82
6.4	Particle size distributions and resulting optical properties . . . . .	86
6.5	Atmospheric profiles . . . . .	87
6.6	MIPAS field of view function . . . . .	88
6.7	Sensitivity to cloud optical thickness . . . . .	90
6.8	Sensitivity to cloud top height . . . . .	91
6.9	Sensitivity to cloud geometrical thickness . . . . .	92
6.10	Sensitivity to particle size (const. IWC) . . . . .	93
6.11	Sensitivity to particle size (const. $\tau_c$ ) . . . . .	94
6.12	Optical properties of polydispersions of varying crystal habit . . . . .	95
6.13	Sensitivity to particle shape (const. IWC, subvisible cirrus) . . . . .	96
6.14	Sensitivity to particle shape (const. IWC, thin cirrus) . . . . .	96
6.15	Sensitivity to particle shape (const. $\tau_c$ , subvisible cirrus) . . . . .	97
6.16	Sensitivity to particle shape (const. $\tau_c$ , thin cirrus) . . . . .	98
6.17	Sensitivity to cloud position . . . . .	99
6.18	Sensitivity to tangent altitude (const. $z_{\text{top}}$ ) . . . . .	100
6.19	Sensitivity to tangent altitude (const. $z_{\text{top}} - z_{\text{tan}}$ ) . . . . .	101
6.20	Sensitivity to surface properties . . . . .	102
6.21	Results of fitting SARTre simulations to MIPAS data – spectra . . . . .	104
6.22	Results of fitting SARTre simulations to MIPAS data – statistics . . . . .	106

# List of Tables

4.1	Characteristics of cloud scenarios . . . . .	47
4.2	Cloud layer setup . . . . .	48
5.1	Sun geometries evaluated in solar RT intercomparison . . . . .	70
6.1	Cirrus cloud size distribution characteristics . . . . .	85
6.2	Summary of observational geometry characteristics . . . . .	88
6.3	Cirrus cloud parameters . . . . .	89
6.4	Cirrus cloud characteristics for crystal habit variation . . . . .	95

