

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen	v
Tabellen	vii
1 Einleitung	1
2 Strahlungstransport in der Atmosphäre	9
2.1 Die Strahlungstransportgleichung	9
2.2 Strahlungsflussdichten	15
2.2.1 Aktinische Strahlungsflussdichte und Photolyse	17
2.3 Streuung und Absorption	17
2.3.1 Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen	19
2.3.2 Mie-Streuung für Aerosolpartikel und Wolkentropfen	20
2.3.3 Atmosphärische Partikel - praktische Verwendung der Theorien	25
2.3.4 Absorption in der Atmosphäre	26
3 Numerische Strahlungstransportmodellierung	31
3.1 Lösungsmethoden für planparallele und inhomogene Atmosphären	31
3.1.1 Diskrete Ordinaten Methode	31
3.1.2 Successive Order of Scattering-Methode	35
3.1.3 Monte Carlo-Methode	37
3.1.4 Independent Pixel Approximation	39
3.2 Eindimensionale Strahlungstransportmodellierung	40
3.2.1 COMPMATRIX	40
3.3 Dreidimensionale Strahlungstransportmodellierung	41
3.3.1 SHDOM	41
3.3.2 LMCM	45
3.3.3 3db-IPA	47
4 Die Modellatmosphäre	49
4.1 Konstruktion einer Modellatmosphäre - Verarbeitung von Flugzeugmes- sungen	49

4.1.1	Luftmoleküle	52
4.1.2	Ozon und Stickstoffdioxid	54
4.1.3	Aerosol	54
4.1.4	Wolkentropfen	59
4.1.5	Berechnung der optischen Eigenschaften von Teilchenensembles .	61
4.1.6	Verarbeitung der Messwerte	64
5	Untersuchungen mit Feldmessungen	67
5.1	Bodenalbedo	67
5.1.1	Sensitivitätsstudie zur räumlichen Variation der Bodenalbedo (Schachbrett)	68
5.1.2	Vergleich mit einer IPA-Rechnung	72
5.1.3	Spektrale Bodenalbedo	73
5.2	Aerosol	77
5.2.1	Zwei Messtage – zwei verschiedene Kampagnen aus INSPECTRO	77
5.2.2	Einfluss der Orographie	89
5.3	Wolken	98
5.3.1	Homogene Bewölkung	98
5.3.2	Inhomogene Bewölkung	106
6	Approximation des horizontalen Photonentransports zur Verbesserung der Independent Pixel Methode	131
6.1	Die Faltung - Gaußsche Glättung	133
6.2	Das vollständige Verfahren	140
6.3	Sensitivitätsstudien an inhomogenen Wolkenfeldern	140
6.3.1	INSPECTRO, inhomogenes Wolkenfeld	140
6.3.2	3D IAAFT-Wolke, geschlossen und inhomogen	144
6.3.3	LES-Wolkenfeld, inhomogen	151
6.3.4	2D IAAFT-Wolken mit veränderlichem Bedeckungsgrad	160
7	Diskussion	165
8	Ausblick	177
	Symbolverzeichnis	179

Abbildungsverzeichnis

2.1	Extinguierendes Medium	11
2.2	Schematischer Weg eines Lichtstrahls	12
2.3	Raumwinkel	12
2.4	F_{akt} und F_{irr}	17
2.5	Phasenfunktion für verschiedene Partikelgrößen	24
2.6	Absorption kurzwellig	26
2.7	Solares Spektrum	27
3.1	Ablaufdiagramm SHDOM	43
3.2	Ablaufdiagramm LMCM	46
4.1	Erste INSPECTRO-Kampagne	50
4.2	Zweite INSPECTRO-Kampagne	53
4.3	Anzahlgrößenverteilung A.P. und W.T.	56
5.1	Horizontalschnitt durch F_{akt} -Feld bei vier stark unterschiedlichen Bodenalbedowerten	68
5.2	Vertikalschnitt durch das F_{akt} -Feld bei $y = 6,0 \text{ km}$ mit den Albedowerten $A = 0,2$ und $A = 0,1$	68
5.3	Quadratische Albedoflächen mit kürzerer Kantenlänge ($800 \times 800 \text{ m}^2$)	69
5.4	Profil der mittleren horizontalen Abweichung vom F_{akt} -Feld mit variabler Bodenalbedo zur Referenzrechnung in Prozen	69
5.5	Bodenalbedo, variable Kantenlänge	70
5.6	Prozentuale Abweichung zur Referenz	72
5.7	Abweichung zur 3D-Simulation	72
5.8	Gemessene Bodenalbedo, auf Höhe $z = 0$ reduziert	75
5.9	Spektrum der aktinischen Flussdichte für verschiedene Bodenalbedowerte unter der Wolkendecke	76
5.10	Flugpfad 12.09.2002	78
5.11	Konzentration der Aerosolpartikel 12.09.2002	78
5.12	SHDOM, DISORT und Messungen im Vergleich, 12.09.2002	80
5.13	Bodenalbedo aus Messung mit Albedometer, Straubing 20.05.2004	82

5.14	Temperatur entlang des Flugpfades, Straubing 20.05.2004	82
5.15	Gesamtanzahl Aerosolpartikel und Extinktionskoeffizienten aus Lidarmes- sung	83
5.16	Verteilungen der gemessen Aerosolpartikel in verschiedenen Höhen	83
5.17	Profile Straubing	86
5.18	Spektrum der aktinischen Strahlungsflussdichte in Bodennähe, Straubing am 20.05.2004	88
5.19	Absorption NO_2	89
5.20	Schematisches Modellgebiet mit Orographie, Molekülanzahl ist konstant in Schicht k	90
5.21	Abstrahlung nur auf den horizontalen Flächen jedoch nicht auf den verti- kalen	90
5.22	Bodenelevation in der Nähe von Straubing	92
5.23	Aktinische Strahlungsflussdichte mit Einbindung von Orographie, IPA- Simulation mit Faltung	94
5.24	Bodenelevation, IPA-Original und IPA gefaltet	95
5.25	Bodenelevation, Abweichungen bei Albedo von Schnee	96
5.26	LWC- und r_{eff} -Profile, Stratus Bewölkung vom 14.9.2002	98
5.27	Aktinische Strahlungsflussdichte, Messung und Simulationen, 14.9.2002 .	100
5.28	Aktinische Strahlungsflussdichte bei 462,0 nm, stratiforme Bewölkung vom 14.09.2002	101
5.29	Wellenlängen- und Höhenabhängigkeit der Simulationsabweichungen . .	103
5.30	Profil der O_3 -Photolyseraten und deren proz. Abweichung, 14.09.2002 . .	104
5.31	Profil der NO_2 -Photolyseraten und deren proz. Abweichung, 14.09.2002 .	104
5.32	Totale optische Dicke des inhomogenen Wolkenfeldes vom 18.09.2002 . .	107
5.33	Wie zuvor, horizontaler Schnitt unterhalb der Wolkenuntergrenze	109
5.34	SHDOM-Simulation der aktinischen Strahlungsflussdichte, durchbroche- ne Bewölkung vom 18.09.2002	110
5.35	xz -Schnitt	114
5.36	Monte Carlo-Simulation der aktinischen Strahlungsflussdichte, durchbrochene Bewölkung vom 18.09.2002	115
5.37	Wie zuvor, horizontaler Schnitt unterhalb der Wolkenuntergrenze	116
5.38	Aktinische Strahlungsflussdichten entlang des Flugpfades vom 18.02.2002 und Häufigkeitsverteilungen	119
5.39	yz -Schnitt	122
5.40	LWC-Gehalt, xz - und yz -Schnitte	124
5.41	Flüssigwassergehalt von IAAFT-Wolken	125
5.42	IAAFT: Konvergenz für SHDOM	127
5.43	Streudiagramm Originale zu Surrogate 1 und Surrogate 2	129

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

v

5.44	IAAFT: Profile und Abweichungen von F_{akt} , 1. Fall	130
5.45	IAAFT: Profile und Abweichungen von F_{akt} , 2. Fall	130
6.1	Mehrfachstreuung durch PSF	133
6.2	Gaußsche Glockenkurve für verschiedene Formparameter	134
6.3	Simulationsablauf	135
6.4	Verlauf der Abweichungen für einen Faltungsprozess	136
6.5	Programmablauf der schnellen aktinischen Strahlungstransportberechnung	141
6.6	INSPECTRO: Faltungskern	142
6.7	INSPECTRO: Aktinische Strahlungsflussdichten, 3D, 3dbIPA und empirisch gefaltet, sowie Häufigkeitsverteilung der Abweichung	143
6.8	Stratiformes Wolkenfeld: Glättungsparameter empirisch und mit PSF . . .	144
6.9	Stratiformes Wolkenfeld: Profil der mittleren aktinischen Strahlungsflussdichten, Erhöhung der Werte unter der Wolkenoberkante	145
6.10	Stratiformes Wolkenfeld: xy-Schnitt durch Mitte des Feldes, Aktinische Strahlungsflussdichten, 3d, 3dbIPA und 2 gefaltete	147
6.11	Stratiformes Wolkenfeld: xz-Schnitt, Aktinische Strahlungsflussdichten, 3D, 3dbIPA und 2 gefaltete	148
6.12	Stratiformes Wolkenfeld: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen in den einzelnen Gitterzellen, alle Wolkenschichten	149
6.13	Wellenlängenabhängigkeit der Simulationsgenauigkeit	150
6.14	LES-Wolken: optische Dicke	152
6.15	LES-Wolken: Mittlere aktinische Strahlungsflussdichten und Extinktionskoeffizient, $SZA=0^\circ$	152
6.16	LES-Wolken: xy-Schnitte der aktinischen Strahlungsflussdichtefelder, Mitte des Wolkenfeldes, $SZA=0^\circ$	153
6.17	LES-Wolken: Mittlere aktinische Strahlungsflussdichten und Extinktionskoeffizient, $SZA=66^\circ$	154
6.18	LES-Wolken: xy-Schnitte von den aktinischen Strahlungsflussdichtefeldern, $SZA=66^\circ$	155
6.19	LES-Wolken: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen, $SZA=66^\circ$	155
6.20	LES-Wolken: Glättungsparameter empirisch und mit PSF, $SZA=66^\circ$. . .	156
6.21	LES-Wolken: Glättungsparameter empirisch und mit PSF, $SZA=0^\circ$	156
6.22	Rauigkeit zweier Strahlungsflussdichtefelder	158
6.23	Anwachsende Optische Dicke: Rauigkeit	159
6.24	Anwachsende Optische Dicke: Qualität der Faltung	159
6.25	LWC der Wolkenfelder mit veränderlichem Bedeckungsgrad	161
6.26	Faltungsleistung in Abhängigkeit vom Anteil der wolkenfreien Pixel . . .	162