

Systematische Bestimmung der bidirektionalen,
spektralen Reflexionsfunktion (BRDF) von städtischen
Flächen aus multispektralen Luftbildern und
Labormessungen

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
am Fachbereich Physik
der Universität Hamburg

vorgelegt von

André Rothkirch

aus Hamburg

Dezember
2001

Gutachter der Dissertation : Prof. Dr. Hartwig Spitzer
: Prof. Dr. Johann Bienlein

Gutachter der Disputation : Prof. Dr. Hartwig Spitzer
: Prof. Dr. Günter Huber

Datum der Disputation : 12.02.2002

Dekan des Fachbereichs Physik
und Vorsitzende / Vorsitzender
des Promotionsausschusses : Prof. Dr. Friedrich-Wilhelm Büber

Kurzfassung

Die Reflexion von elektromagnetischer Strahlung an einer Oberfläche ist im Allgemeinen richtungsabhängig und kann im Bereich des sichtbaren Lichts und der Infrarotstrahlung durch die *Bidirectional Reflectance Distribution Function BRDF* beschrieben werden. In dieser Arbeit wurde das Reflexionsverhalten von Oberflächen untersucht, welche für die Fernerkundung städtischer Gebiete wichtig sind. Es wurden Labormessungen der Proben 'Spectralon', 'Rote Dachziegel' und 'Bestreute Dachpappe' an der *European Goniometric Facility (EGO)* des *Joint Research Center* in Ispra, Italien, durchgeführt. Unter Verwendung eines linear polarisierten Lasers wurden Messungen bei horizontaler (s) und vertikaler (p) Polarisation der einfallenden Strahlung durchgeführt. Das gestreute Licht wurde sowohl parallel (*like*-Polarisation) als auch senkrecht (*cross*-Polarisation) zur Orientierung der Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung gemessen. Grundlegende Merkmale in der Reflexion sind eine Zunahme der Streuung in Vorwärtsstreurichtung bei *like*-Polarisation sowie ein unterschiedlich ausgeprägtes Reflexionsverhalten in Abhängigkeit von der Polarisationsorientierung. Die rauheste Probe zeigt zudem ein Anstieg der BRDF in Rückstreurichtung. Bei *cross*-Polarisation verhalten sich zwei der Proben lambertsch. Die Beschreibung der Messungen erfolgt anhand des BRDF-Modells von Torrance & Sparrow, welches die charakteristischen Merkmale in der Reflexion wiedergibt. Die beste Modellbeschreibung resultiert bei Verwendung eines komplexen Brechungsindex als Modellparameter. Die Proben 'Spectralon' und 'Rote Dachziegel' zeigen eine von der Polarisation der einfallenden Strahlung unabhängige Gesamtalbedo.

Desweiteren wurde in dieser Arbeit die spektrale Genauigkeit von Reflektanzbildern städtischer Gebiete bei Verwendung des Multispektral-Sensors DAEDALUS AADS 1268 bestimmt. Es erfolgte ein Vergleich von mit einem Atmosphärenmodell bestimmten Reflektanzen mit parallel zur Befliegung durchgeführten Bodenmessungen. Es zeigten sich signifikante Abweichungen zwischen den Reflektanzwerten. Nach einer Transformation der aus dem Modell bestimmten Reflektanzwerte auf die Bodenmessungen resultierten Genauigkeiten in der absoluten Reflektanz ρ zwischen $\pm 7\% \cdot \rho$ und $\pm 20\% \cdot \rho$, abhängig von Bildinhalt und Spektralkanal. Anhand der Bilddaten des DAEDALUS-Sensors wurde gezeigt, daß BRDF-Effekte einen Einfluß auf die Klassifikation von Reflektanzbildern haben. Insbesondere Kies-, Asphalt- und Metaldächern zeigen Auffälligkeiten, welche bei der Auswertung von mittlerweile verfügbaren hochauflösenden Stereo-Satellitenbildern genutzt werden könnten. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde zudem ein *Schattenfilter* entwickelt, welcher die Reflektanzinformationen in den Spektralkanälen des IKONOS-Satelliten nutzt. Dieser erreicht mit den vorgegebenen Schwellwerten eine akzeptable, bei städtischen Flächen auch eine gute Erkennung von Schattenflächen im Sinne des κ -Wertes. Der Filter kann auch für Bilder anderer Sensoren verwendet werden, wenn diese ähnliche Spektralkanäle aufweisen, wie z.B. die Sensoren DAEDALUS oder LANDSAT. Anhängig vom Bildinhalt und der Pixelauflösung bedarf es ggf. der Anpassung der Schwellwerte.

Abstract

Surface reflection of electromagnetic radiation usually depends on illumination and viewing geometry and can be described by the *Bidirectional Reflectance Distribution Function BRDF*. This study focuses on the BRDF of urban surface materials. Multiangular laboratory measurements of 'Spectralon', 'Red roof tile' and 'Sanded roof paper' were made at the *European Goniometric Facility (EGO)* at the *Joint Research Center* in Ispra, Italy. We used a linearly polarized HeNe-laser as illumination source and a spectroradiometer with a mounted polarizer as detector. Measurements were done at horizontal (s) and vertical (p) polarisation states relative to the principal plane, resulting in measurements at four different combinations of source and detector orientation (ss , sp , ps and pp). At *like*-polarization the basic reflection characteristics of our surface materials are an increasing BRDF in forward scattering direction with increasing illumination and viewing angle. The increase at ss -polarization is stronger than at pp -polarization. The very rough surface also showed an increasing BRDF in backward scattering direction. At *cross*-polarization two samples can be assumed to be lambertian. The measurements were described by the BRDF model for specular reflection of rough surfaces by Torrance & Sparrow, which gives the characteristic reflection features. Best modelling results were obtained by using a complex index of refraction within the model. The total albedos at s - and p -polarized incident light are the same for the 'Spectralon' sample as well as for the sample 'Red roof tile'.

This study also determined the spectral accuracy of reflectance images of urban areas derived from image data of the multispectral line scanner DAEDALUS AADS 1268. A comparison was done between reflectance values obtained from atmospheric modeling and ground based reflectance measurements. Significant differences were found and a transformation of the aerial data to the ground measurements was applied. The resulting accuracy of the aerial image reflectance ρ varied between $\pm 7\% \cdot \rho$ and $\pm 20\% \cdot \rho$, depending on scene content and wavelength.

It was shown that classification of DAEDLAUS reflectance data is affected by BRDF effects. Significant variations in reflectance with varying viewing angle were found at roof coverings made from gravel, asphalt or metal. This result is of benefit for analysis of high resolution satellite data, i.e. classification using stereo image pairs. In addition a *shadow filter* was developed, which uses reflectance data corresponding to the spectral bands of the IKONOS satellite. The given thresholds allow good to acceptable detection results (κ -value) in urban areas. The filter can be applied to other sensors with similar spectral bands like i.e. DAEDALUS or LANDSAT. Depending on pixel resolution and image content, thresholds adjustment is needed for best results.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungs- u. Symbolverzeichnis	viii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	5
2.1 Physikalische Größen	5
2.1.1 Strahldichte L , Strahlungsflußdichte E_i und Albedo ρ	5
2.1.2 Spektrale Reflexionsfunktion BRDF und Bikonischer Reflektanzfaktor BRF	7
2.2 Spiegelnde Reflexion und Polarisierung	8
3 BRDF-Effekte in Luftbildern	11
3.1 Befliegungen und Bodenmessungen	11
3.1.1 Messung der Reflektanzen mit DAEDALUS	15
3.1.2 Bodenmessungen mit dem Spektroradiometer	22
3.1.3 Vergleich der Spektren von IRIS und DAEDALUS	38
3.1.4 Umrechnung der DAEDALUS-Reflektanzen auf die IRIS-Bodenmessungen	43
3.2 BRDF in Luftbildern	48
4 Labormessungen zur BRDF künstlicher Oberflächen	61
4.1 Meßaufbau	61
4.1.1 Lichtquelle und Detektor	61
4.1.2 Verwendete Probenflächen	63
4.2 Durchführung der Messungen	66
4.3 Bestimmung von BRDF-Werten	66
4.3.1 Berechnung der reflektierten Strahldichte L_r	67
4.3.2 Bestimmung der einfallenden Strahlungsflußdichte E_i	69
4.3.3 Weitere Fehlerquellen der Messung	71

4.3.4	Gesamtfehler	72
4.4	Meßergebnisse	73
5	Anpassung einer Modellfunktion	77
5.1	Diskussion zur Modellwahl	77
5.2	BRDF-Modell Torrance & Sparrow	78
5.3	Anpassungsergebnisse	80
5.3.1	Messungen außerhalb der Hauptebene	95
5.4	Betrachtungen zur Albedo	99
6	Zur Berücksichtigung von BRDF-Effekten in der Verarbeitung von Luft- und Satellitenbildern	101
6.1	Unterschiede in der Klassifikation aufgrund verschiedener Winkelstellungen	103
6.1.1	Vorbemerkung	103
6.1.2	Datenmaterial	104
6.1.3	Klassifikation von Reflektanzbildern	104
6.1.4	Der Schattenfilter	108
6.1.5	Rechnergestützter Vergleich der Klassenkarten	114
6.1.6	Folgerung und Ausblick	126
7	Zusammenfassung	129
A	Anhang	137
A.1	Der Zeilenscanner DAEDALUS AADS 1268	137
A.2	Reflektanzspektren von Asphalt (Beispiele)	140
A.3	Scanstreifen mit starker Bewölkung	141
A.4	Zum Detektoraufbau des SE590	141
A.5	Messungen zu Geräteeigenschaften des SE590	143
A.5.1	Messung des Polarisationsgrad des verwendeten Lasers	143
A.5.2	Gesichtsfeld des Detektors	143
A.6	Verwendete Steuerfiles für das Goniometer	144
A.6.1	Aufbau der Steuerfiles	146
A.6.2	Illustration der Winkelabdeckung der Messungen	149
A.7	Ergebnisse des Schattenfilters für die Nürnberg-Gesamtszene	151
A.7.1	Quantitative Abschätzung	156
	Literaturverzeichnis	162

Abbildungsverzeichnis

1.1	Illustration zur Streuung von Licht	2
2.1	Geometrie der Reflexion	6
2.2	Illustration zur Reflexion und Transmission	9
2.3	Fresnel Reflexionskoeffizienten (Beispiel)	10
3.1	Befliegungsplan der Stadt Nürnberg für die Jahre 1994/95	13
3.2	Befliegungsplan der Stadt Nürnberg für das Jahr 1997	14
3.3	Bestimmung der mit dem DAEDALUS gemessenen Reflektanzen	15
3.4	Strahldichte-Rausch-Äquivalent des DAEDALUS Detektors	17
3.5	Relativer Fehler des Meßsignals durch Detektorrauschen	18
3.6	Unterschiede in der erwarteten Strahldichte bei verschiedenen Atmo- sphärenparametern	19
3.7	Winkelabhängigkeit des DAEDALUS-Detektors	21
3.8	Meßorte der Bodenmessungen	23
3.9	Meßort 1: Flughafenvorfeld	24
3.10	Meßort 2: Asphalt Flughafen	24
3.11	Meßort 3: Tennisplatz	25
3.12	Meßort 4: Kunstrasen	26
3.13	Meßort 5: Asphalt Gewerbegebiet	26
3.14	Meßort 6: Naturrasen	27
3.15	Schematischer Aufbau des Spektroradiometers IRIS	28
3.16	Illustration der Gittersprungkorrektur	29
3.17	Prozessierungsverlauf bei der IRIS - Datennahme	30
3.18	Verhältnis von Target- und Referenzkanal des IRIS-Spektrometers	31
3.19	Illustration zur Umrechnung der IRIS-Reflektanzspektren	34
3.20	Beispiel für ein in die spektrale Auflösung des DAEDALUS Sensors umge- rechnetes IRIS-Reflektanzspektrum	35
3.21	Beispiel zur Bestimmung der mittleren IRIS-Reflektanz	36
3.22	Spektren der Bodenmessungen der Jahre 1994, 1995 und 1997	37
3.23	Vergleich von IRIS- und DAEDALUS-Spektren in den Jahren 1994 u. 1995	40
3.24	Vergleich von IRIS- und DAEDALUS-Spektren im Jahr 1997	41
3.25	Vergleich von IRIS- und DAEDALUS-Spektren im Jahr 1997	42
3.26	Reflektanzspektren nach der Rekalibration	44
3.27	Beispiel zur Genauigkeit der Reflektanzbilder	46
3.28	Illustration der Beleuchtungsgeometrie	48

3.29	Beispiel zur Illustration von BRDF-Effekten in Luftbildern	49
3.30	Gewählte Flächen für die Illustration von BRDF-Effekten	50
3.31	Beschreibung der 3D-Plots	52
3.32	Zur Illustration der aufgetragenen Winkel	53
3.33	Reflektanzfaktoren verschiedener Flächen, Teil 1	54
3.34	Reflektanzfaktoren verschiedener Flächen, Teil 2	55
3.35	Reflektanzfaktoren verschiedener Flächen, Teil 3	56
3.36	Reflektanzfaktoren verschiedener Flächen, Teil 4	57
3.37	Reflektanzfaktoren verschiedener Flächen, Teil 5	58
4.1	Goniometer des Joint Research Center (JRC)	62
4.2	Auflösungsvermögen des SE590-Detektors	63
4.3	Photo der Probe 'Spectralon'	64
4.4	Albedo der Probe 'Spectralon'	64
4.5	Photo der Probe 'Rote Dachziegel'	65
4.6	Photo der Probe 'Rote Dachziegel', Vergrößerung	65
4.7	Photo der Probe 'Bestreute Dachpappe'	66
4.8	Photo der Probe 'Bestreute Dachpappe', Vergrößerung	66
4.9	Häufigkeitsverteilung der Dunkelstrommessungen	68
4.10	Bestimmung der reflektierten Strahldichte	70
4.11	Meßsignal bei unterschiedlichen Polarisatorstellungen	72
4.12	Beispiel gemessener BRDF-Werte (= BRF / π) für die Proben 'Spectralon' und 'Rote Dachziegel'.	74
5.1	Kurzübersicht der Modellannahmen im Modell von Torrance & Sparrow	79
5.2	Anpassungsergebnis des Modells an die Meßwerte der Probe 'Rote Dach- ziegel' bei <i>like</i> -Polarisation	83
5.3	Anpassungsergebnis des Modells an die Meßwerte der Probe 'Rote Dach- ziegel' bei <i>cross</i> -Polarisation	84
5.4	Anpassungsergebnis des an die Meßwerte der Probe 'Spectralon' bei <i>like</i> - Polarisation	85
5.5	Anpassungsergebnis des Modells an die Meßwerte der Probe 'Spectralon' bei <i>cross</i> -Polarisation	86
5.6	Anpassungsergebnis des Modells an die Meßwerte der Probe 'Bestreute Dachpappe' bei <i>like</i> -Polarisation	87
5.7	Anpassungsergebnis des Modells an die Meßwerte der Probe 'Bestreute Dachpappe' bei <i>cross</i> -Polarisation	88
5.8	Kombinierte Darstellung der Anpassungsergebnisse	89
5.9	Gewählte Verteilung der V-Förmigen Vertiefungen für die Probe 'Bestr. Dachpappe'	91
5.10	Anpassungsergebnis des Modells an die Meßwerte der Probe 'Bestreute Dachpappe' bei <i>like</i> -Polarisation	93
5.11	Anpassungsergebnis bei Verwendung eines reellen Brechungsindex	94

5.12	Gegenüberstellung von Modell und Meßergebnissen außerhalb der Hauptebene	96
5.13	Illustration des Reflexionsverhalten von Spectralon außerhalb der Hauptebene	97
5.14	Illustration des Reflexionsverhalten der Probe 'Rote Dachziegel' außerhalb der Hauptebene	98
6.1	Illustration zur Datennahme unter verschiedenen Beobachtungswinkeln . .	102
6.2	Illustration der Datensätze für die Klassifikation.	105
6.3	Illustration zur Vorgehensweise bei der Klassifikation.	106
6.4	Klassenkarten des Gewerbegebietes 'Andernacher Straße'	107
6.5	Gewerbegebiet 'Andernacher Straße', Nürnberg, März 2000	110
6.6	Potentielle Schattenpixel nach dem Kriterium 1	111
6.7	Ergebnis des Kriteriums 2	111
6.8	Ergebnis des Kriteriums 3	112
6.9	Ergebnismaske der Kombination der Kriterien K1 - K3	112
6.10	Schattenmaske, für welche Objektgröße und Umfang berücksichtigt wurden.	113
6.11	Schattenflächen in den verschiedenen Flugstreifen.	115
6.12	Illustration der Unterschiede zwischen Vergleichs- und Referenzdatensatz. .	116
6.13	Numerierung der Bodenpunkte	117
6.14	Spektren verschiedener Bodenpunkte.	119
6.15	Spektren verschiedener Bodenpunkte.	120
6.16	Spektren verschiedener Bodenpunkte.	121
A.1	Schematische Darstellung des DAEDALUS AADS 1268	138
A.2	Spektrale Empfindlichkeiten des DAEDALUS AADS1268	139
A.3	Reflektanzspektren verschiedener Asphaltoberflächen	140
A.4	Scanstreifen mit starker Bewölkung	141
A.5	Skizze Detektoraufbau	142
A.6	Skizze der Standard-Spalt-Apertur am SE 590	142
A.7	Skizze Detektorbestückung	142
A.8	Meßaufbau zur Bestimmung des Polarisationsgrades des Lasers	143
A.9	Gesichtsfeld des SE590 Detektors mit Standard-Spalt	145
A.10	Polardarstellung der Winkelabdeckung der Messungen in der Hauptebene .	149
A.11	Polardarstellung der Winkelabdeckung der Messungen ohne Polarisationsfilter	150
A.12	Vergleich von Reflektanz- und Rohdatenbild für die vier Kanäle des IKONOS-2-Satelliten	152
A.13	Reflektanzbild von Nürnberg (Falschfarben-Infrarot-Darstellung)	153
A.14	Ergebnis des Schattenfilters mit Form-Kriterium 1	154
A.15	Ergebnis des Schattenfilters mit Form-Kriterium 2	155
A.16	Zur Schattenbewertung, Testflächen 1 bis 7	159
A.17	Zur Schattenbewertung, Testflächen 8 bis 14	160
A.18	Zur Schattenbewertung, Testflächen 15 bis 20	161

Tabellenverzeichnis

3.1	Flugzeiten und -höhen der Nürnberg-Befliegungen '94, '95, '97	12
3.2	Mittleres relatives Detektorrauschen des IRIS Spektrometers	32
3.3	Relative Genauigkeit der IRIS-Reflektanzen	35
3.4	Erwartete Reflektanzunterschiede aufgrund von BRDF-Effekten für verschiedene Bodenflächen	39
3.5	Koeffizienten zur Umrechnung der DAEDALUS-Reflektanzen	47
5.1	Parameter aus der Anpassung des Modells von Torrance & Sparrow	81
6.1	Reflektanzen in verschiedenen Flugstreifen	123
6.2	Mittlere Reflektanzen in verschiedenen Flugstreifen	125
A.1	Verallgemeinerte Übersicht der Spektralbereiche des DAEDALUS-Scanners	137
A.2	Anweisungen innerhalb der Goniometer-Steuerdatei	146
A.3	Transformationskoeffizienten für die IKONOS-Daten von Nürnberg	151
A.4	Aufbau Konfusionsmatrix	156
A.5	Der κ -Wert durch Worte beschrieben.	157

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Symbol / Abkürzung	Beschreibung	Einheit
A	Fläche	[m ²]
DN	Grauwert (engl. <i>Digital Number</i>)	
i (tiefgestellt)	Abkürzung einfallend (von engl. <i>incident</i>)	
r (tiefgestellt)	Abkürzung reflektiert	
ρ	Albedo	[-]
λ	Wellenlänge	[nm] oder [μm]
L_λ	spektrale Strahldichte	[W / (m ² sr μm)]
E	spektrale Strahlungsflußdichte	[W / (m ² μm)]
$\theta_{i,r}$	Einfalls-, Beobachtungszenitwinkel	[Grad] oder [rad]
$\phi_{i,r}$	Einfalls-, Beobachtungsazimutwinkel	[Grad] oder [rad]
JRC	Joint Research Centre, Ispra, Italien	
EGO	European Goniometric Facility	
SE590	Spectroradiometer SE590	
C	Kalibrationsfaktor	[W / (m ² sr μm DN)]
L_{NE}	Strahldichte-Rausch-Äquivalent	[W / (m ² sr μm)]
M_T	Meßsignal im Targetkanal	[DN]
M_R	Meßsignal im Referenzkanal	[DN]
F_D	Detektorfunktion	[-]
ρ_R	Reflektanz einer Referenzfläche	[-]
ρ_{Sp}	Reflektanz einer Spectralonfläche	[-]
IRIS	Spectroradiometer IRIS, Fa. GER, USA	
$\rho_{IRIS}^{\text{Band } j}$	IRIS-Reflektanz, umgerechnet in die spektrale Auflösung des DAEDALUS-Kanals j	[-]
f_r	Spektrale Reflexionsfunktion	[sr ⁻¹]
FHWM	Volle Signalbreite auf halber Höhe	[nm]
BRDF	Spektrale Reflexionsfunktion	[sr ⁻¹]
BRF	Bikonischer Reflexionsfaktor	[-]
r_i	Empfindlichkeit	[-]
\vec{n}	Flächennormale	
$\hat{m} = n + ik$	komplexer Brechungsindex	

1 Einleitung

Multispektrale Luft- und Satellitenbilder haben sich zu einem Werkzeug für eine Vielzahl von Anwendungen entwickelt. Diese umfassen sowohl die globale Beobachtung der Umwelt (z.B. 'Earth System Science'-Programm der NASA¹ oder verschiedene Produkte² der Earthwatch Inc., USA) als auch eher regionale Anwendungen wie das Auffinden von Rohstoffen, der Bestimmung der Landnutzung oder die Untersuchung von Gewässern. Für eine Vielzahl von Anwendungen werden die gewonnenen Daten unter Zuhilfenahme eines Atmosphärenmodells auf *Reflektanzwerte* zurückgeführt, d.h. auf von der Beleuchtung und den Sensoreigenschaften unabhängige Größen. Für die sich z.B. daraus ergebende Möglichkeit einer automatisierten Erkennung des Oberflächenmaterials ist eine möglichst genaue Bestimmung der Reflektanzen notwendig. Diese hängt neben einer akkuraten Kalibration der Meßinstrumente auch von der Charakterisierung der Atmosphäre ab. [Sch98] hat in diesem Zusammenhang gezeigt, daß die Charakterisierung eines Bodenspektroradiometers und dessen Meßunsicherheiten die Zuverlässigkeit der gemessenen Daten signifikant verbessern kann, da Reflektanzmessungen die meisten systematischen (Meß-)Fehler eliminieren, so daß die im Feld auftretenden Unsicherheiten kleiner als die der absoluten Strahlungskalibrierung im Labor sind.

Bei der Bestimmung von Reflektanzwerten unberücksichtigt bleiben häufig die *winkelabhängigen Reflexionseigenschaften* einzelner Oberflächen, d.h. die Änderungen der Reflexion in Abhängigkeit von den Beleuchtungs- und Beobachtungswinkeln.

Im Allgemeinen [Hor86] stützt man sich bei der Beschreibung der Streuung auf einen der Idealfälle *spiegelnde Reflexion* oder *Lambertsche Streuung*. Glatte Oberflächen werden gemeinhin durch spiegelnde Reflexion beschrieben, d.h. das einfallende Licht wird lediglich in eine Richtung reflektiert. Für rauhe Oberflächen bedient man sich vor allem der Lambertschen Annahme, d.h. die Streuung erfolgt isotrop in jede Richtung des oberen Halbraumes (siehe Abb. 1.1).

Die Streuung an realen Oberflächen entspricht häufig weder der spiegelnden Reflexion noch der Lambertschen Streuung. Sie kann eher als eine Überlagerung der beiden Idealfälle gesehen werden. Dabei kann aufgrund der Oberflächenstruktur (durch Abschattungen und Verdeckungen) ein erhöhtes Streuverhalten in Rückstreurichtung auftreten. Bei Vegetation ist das Rückstreuverhalten besonders stark ausgeprägt (der sogenannte 'hotspot'). Die Reflexion an realen Oberflächen zeigt von daher eine Variation mit wechselnder Beleuchtungs- und / oder Beobachtungsgeometrie. Die Variation liegt vielfach in Bereichen um relativ 5–10%. In Extremfällen (z.B. bei Vegetation oder Beobachtungen

¹http://eosps0.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/description.html

²<http://www.digitalglobe.com/products/index.shtml>

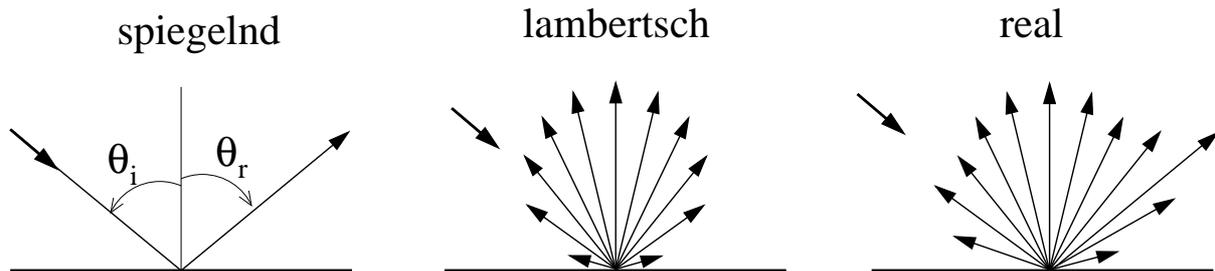


Abbildung 1.1: Illustration zur Streuung von Licht. Die linke Grafik illustriert die spiegelnde Reflexion: das unter einem Zenitwinkel θ_i einfallende Licht wird nur in die Richtung $\theta_i = \theta_r$ reflektiert (der relative Azimutwinkel beträgt 180°). Die mittlere Grafik zeigt lambertsche Streuung: das einfallende Licht wird isotrop in alle Richtungen des oberen Halbraumes gestreut. Der Strahlungsfluß ist proportional zum Kosinus des Ausfallszenitwinkels, wie durch die Länge der Pfeile angedeutet (für einen Strahldichte messenden Sensor ist die gesehene Fläche umgekehrt proportional zum Kosinus des Ausfallszenitwinkels woraus eine Unabhängigkeit der gemessenen Strahldichte vom Beobachtungswinkel resultiert). Die rechte Grafik illustriert den mehr realistischen Fall der Reflexion. Dieser kann als eine Mischung von spiegelnder und lambertscher Reflexion gesehen werden. Zudem kann z.B. durch Abschattungen und Verdeckungen eine erhöhte Streuung in Rückwärtsrichtung auftreten.

in der Hauptebene) können auch Variationen bis zu einem Faktor ≈ 3 auftreten. Dieses winkelabhängige Streuverhalten kann durch die von [Nic70] definierte spektrale Reflexionsfunktion BRDF (engl. *Bidirectional Reflectance Distribution Function*) beschrieben werden, welche wir im Folgenden verwenden (siehe auch Kap. 2.1.2).

Für die praktische Anwendung kann dieses winkelabhängige Reflexionsverhalten von Oberflächen zur Folge haben, daß man für ein und dieselbe Oberfläche unterschiedliche Reflektanzwerte bestimmt, wenn diese z.B. bei unterschiedlichem Sonnenstand (z.B. entnommen aus zwei Satellitenbildern der Zeitpunkte $T_1 \neq T_2$) oder mit unterschiedlichem Beobachtungswinkel aufgenommen wurde. Bei einem Vergleich der Reflektanzen, z.B. bei der computergestützten Änderungsdetektion³, können dadurch Änderungen angezeigt werden, obwohl gar keine Änderung der Fläche stattgefunden hat (auch der umgekehrte Fall wäre denkbar). Das Auffinden von Änderungen ohne erkennbare bauliche Veränderungen wird z.B. in [ZZFL00] genannt.

Die Notwendigkeit einer genaueren Beschreibung der Winkelabhängigkeit der Streuung ist klar erkannt worden, im Bereich der Fernerkundung ([MJG⁺90, WSH⁺97, LS94, HDd90, RID91]) ebenso wie im Bereich der Computer Vision ([NIK91, KvDS96, ON94, Wol96, FDFH95, GSK98]). Untersuchungen zum Streuverhalten existieren für verschiedene Oberflächentypen, in der Fernerkundung insbesondere für natürliche Oberflächen wie z.B. Vegetation, Boden oder Wüstenlandschaften (z.B. [SD99, TSK99, SS86, Völ93]). Untersuchungen zur Steigerung der Genauigkeit bei der Reflektanzbestimmung mittels Atmosphärenmodell durch Berücksichtigung der BRDF von natürlichen Oberflächen (Sojabohnen, gepflügten Feldern, Weizen und Rasen) finden sich z.B. in [Qiu01]. Be-

³Computergestützte Änderungsdetektion wird z.B. in [NLS97, Nie00, CCY01] beschrieben.

schreibungen des Reflexionsverhaltens von künstlichen Oberflächen finden sich z.B. in [GBF93, HMB99, GSK98] sowie in der öffentlich zugänglichen BRDF-Datenbank [CUR96] und deren Dokumentation [DGNK99].

In den Untersuchungen zur BRDF von künstlichen Oberflächen finden sich städtischen Oberflächentypen wie z.B. Dachbedeckungen oder Asphalt bisher selten. Die zunehmende Verfügbarkeit von Satelliten mit Bodenauflösungen im (Sub)Meter-Bereich⁴ eröffnet u.a. die Verwendung von Multispektralbildern für die Stadtplanung. Hierbei ist die Bestimmung der Albedo (und damit der BRDF) nötig, z.B. bei der Berechnung der Energiebilanzen an der Oberfläche.

Unsere Arbeitsgruppe entwickelt Methoden für die computergestützte Auswertung von hochaufgelösten Luft- und Satellitenbildern. Ein Teil der Studien besteht dabei in der Bestimmung des winkelabhängigen Reflexionsverhaltens von künstlichen Oberflächen, insbesondere für *städtische Gebiete*.

Hierzu wurde im August 1997 eine Befliegung des nördlichen Stadtgebiets von Nürnberg mit dem flugzeuggestützten Zeilenscanner DAEDALUS AADS 1268, betrieben durch die DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), durchgeführt. Die aufgezeichneten Daten wurden im Rahmen dieser Arbeit in Reflektanzwerte überführt und mit parallel zur Befliegung durchgeführten Bodenmessungen verglichen. Dabei wurde auf Arbeiten zur Berechnung von Reflektanzbildern von [Hep94] und [Kol96] zurückgegriffen. Aus der Betrachtung einzelner Fehlerquellen der Meß- und Auswerteschritte sowie von Unsicherheiten in der Atmosphärensimulation wurde die Genauigkeit der bestimmten Reflektanzwerte abgeleitet [RKS98]. Die Ausdehnung der Fehlerbetrachtung auf Messungen in den Jahren 1994/5 erlaubte dabei vertiefende Aussagen über zu erwartende zeitliche Veränderungen.

In den Reflektanzbildern von 1997 wurden BRDF-Effekte in städtischen Bildszenen aufgezeigt und starke BRDF-Effekte aufweisende Oberflächen im Rahmen von Vorort-Begehungen näher spezifiziert. Anhand der erhaltenen Ergebnisse wurden *Labormessungen* verschiedener künstlicher Oberflächen am Joint Research Centre in Ispra, Italien, durchgeführt. Diese fanden im Rahmen zweier Meßkampagnen zur Untersuchung rauher, städtischer Oberflächen am EGO (European Goniometric Facility [KHA⁺94]) statt. In der einen, von G. Meister [Mei00] durchgeführten Meßkampagne, wurde das Reflexionsverhalten verschiedener städtischer Oberflächen unter Verwendung einer Halogenlampe bestimmt. Die zweite Kampagne ist Bestandteil dieser Arbeit und verwendete anstelle einer unpolarisierten Lichtquelle einen *linear polarisierten HeNe-Laser*. Die Ergebnisse fanden Eingang in ein BRDF-Modell für Stadtgebiete mit unterschiedlichen Gebäudefor-

⁴Bilddaten mit 1 m Bodenauflösung liefert z.B. der im September 1999 erfolgreich gestartete IKONOS-2 Satellit [Ger00]. Lizenzen für Bodenauflösungen bis 0,5 m sind durch die National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) im Dezember 2000 an Earthwatch Inc., Longmont, CO 80501-6700, USA, und Space Imaging, Thornton, CO 80241, USA, vergeben worden. Earthwatch Inc. hat daraufhin die Auflösung des 'QuickBird 2'-Satelliten auf 0,61 m erhöht. Dieser wurde am 18. Oktober 2001 mit einer Delta II Rakete von der Vandenberg Air Force Base in Kalifornien erfolgreich gestartet. Der QuickBird-Satellit umkreist die Erde in einer Höhe von 450 km bei einer 98°, sonnensynchronen Neigung. Bildaufnahmen werden nach Beendigung der Prüf- und Kalibrationsphase beginnen (Stand Dez. 2001).

men, Verkehrs- und Vegetationsflächen [MRSB01].

[PV92] beschreibt die Notwendigkeit der Beschreibung des winkelabhängigen Reflexionsverhaltens durch physikalisch basierte mathematische *Modelle*. Dabei stellt die Berücksichtigung der Orientierung der Polarisationsrichtung eine zusätzliche Informationsquelle dar. In dieser Arbeit wurden Messungen bei horizontaler (*s*) und vertikaler (*p*) Polarisation der einfallenden Strahlung durchgeführt. Das gestreute Licht wurde sowohl parallel (*like*-Polarisation) als auch senkrecht (*cross*-Polarisation) zur Orientierung der Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung gemessen, d.h. bei insgesamt 4 verschiedenen Kombinationen.

Wir fanden, daß die künstlichen Oberflächen Unterschiede im Reflexionsverhalten in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung aufweisen. Bei *like*-Polarisation weisen die Proben einen Anstieg der Streuung in Vorwärtsrichtung auf, die rauheste Probe zeigt zudem ein Anstieg der BRDF in Rückstreurichtung. Der Anstieg der Streuung ist für *s*-Polarisation zumeist deutlich stärker als bei *p*-Polarisation. Bei *cross*-Polarisation verhalten sich zwei der Proben Lambertsch. Die charakteristischen Merkmale der Streuung können durch ein semiempirisches Modell von [TS67] beschrieben werden (siehe Kap. 5.2), wobei die Beiträge der *cross*-Polarisation jeweils als Lambertsch angenommen wurden. Für die Proben 'Spectralon' und 'Rote Dachziegel' zeigt sich, daß deren jeweilige Gesamtalbedo unabhängig von der Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung ist. Die Größe der Teilbeiträge zur Gesamtalbedo ist dabei verschieden für *s*- und *p*-Polarisation.

Im Folgendem werden in Kapitel 2 die radiometrischen Größen definiert und die Nomenklatur für Polarisationsmessungen illustriert. Daran anschließend werden in Kapitel 3 die Befliegung der Stadt Nürnberg sowie die parallel durchgeführten Bodenmessungen beschrieben. Es werden Meß- und Modellunsicherheiten bestimmt und die resultierenden Unsicherheiten der Reflektanzbilder für die Jahre 1994, 1995 und 1997 angegeben. Es werden die Reflektanzbilder des Jahres 1997 auf BRDF-Effekte hin untersucht. Die durch diese motivierten Labormessungen werden in Kap. 4 beschrieben. Es wird eine eingehende Fehlerrechnung der Labormessungen dargelegt, da diese die ersten umfangreichen Messungen am EGO mit Laserlicht darstellen und somit eine Basis für folgende Messungen bildet. Kapitel 5 beschreibt das zur Modellierung der Labormessungen verwendete Modell und zeigt die resultierenden Modellergebnisse. Überlegungen zur Berücksichtigung von BRDF-Effekten in der Verarbeitung von Luft- und Satellitenbildern werden in Kapitel 6 illustriert. Dieses beinhaltet u.a. die Einführung eines Schattenfilters, welcher auf Reflektanzinformationen in vier Spektralkanälen (denen des IKONOS-2-Satelliten) basiert. Dies ermöglichte auch die Verwendung des Schattenfilters im Rahmen der Methodentwicklung zur Änderungsdetektion, siehe [SFK⁺01]. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung.

2 Grundlagen

Im Folgendem wird ein Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten Definitionen und Notationen gegeben. Dieser beinhaltet neben der Erläuterung der radiometrischen Größen auch eine Kurzbeschreibung zur spiegelnden Reflexion und Angaben zum Fresnel Reflexionskoeffizienten.

Weiterführende Erläuterungen zu den physikalischen Größen und Wechselwirkungen sind u.a. in [Hap93], [Kra94], [Kra90],[KS88] und [Sto95] zu finden. Nähere Ausführungen zu Techniken der Bildverarbeitung geben z.B. [DH73], [Ric93] oder [Jäh93].

2.1 Physikalische Größen

Die in der Fernerkundung zur Beschreibung der Ausbreitung und der Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen verwendeten Begriffe werden im Folgenden erläutert. Die Bezeichnungen stützen sich auf [KSS75], die Nomenklatur geht auf [Nic70] vom National Bureau of Standards / USA zurück.

2.1.1 Strahldichte L , Strahlungsflußdichte E_i und Albedo ρ

Elektromagnetische Wellen sind als Strahlungsfluß Φ [W] meßbar (von den Photonen am Detektor verrichtete Arbeit pro Zeiteinheit). Mittels Kalibrierung des Meßgerätes läßt sich dieser umrechnen in die *Strahldichte* L [KSS75]:

$$L = \frac{\partial^2 \Phi}{\cos \theta \cdot \partial A \cdot \partial \omega} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ sr}} \right] \quad (2.1)$$

Sie gibt den Strahlungsfluß Φ in einer bestimmten Richtung θ pro Raumwinkel $\partial \omega$ und senkrecht zum Sehstrahl projizierter Fläche $\cos \theta \cdot \partial A$ an (vgl. Abbildung 2.1, ∂A entspricht der Fläche auf der beleuchteten Oberfläche dA in der Abbildung).

Beschränkt man sich bei der Messung auf Teilbereiche des Wellenlängenspektrums, mißt also den Strahlungsfluß $\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} d\lambda$, so erhält man bei hinreichend kleiner spektraler Auflösung den spektralen Strahlungsfluß $\Phi_\lambda = \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}$. Mittels Kalibrierung läßt sich dieser wiederum in die *spektrale Strahldichte* L_λ umrechnen, d.h. die Strahldichte in einem Wellenlängenintervall $[\lambda, \lambda + \Delta\lambda]$:

$$L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}} \right] \quad (2.2)$$

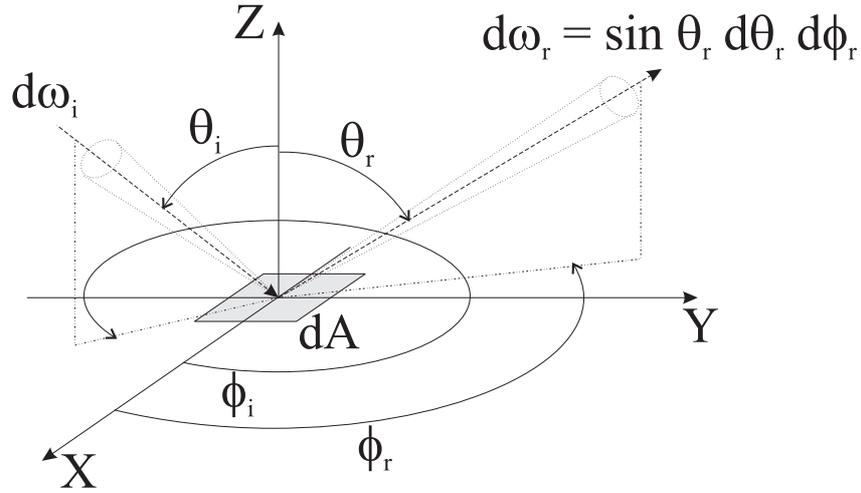


Abbildung 2.1: Geometrie der Reflexion.

Stellt man den einfallenden Strahlungsfluß Φ_i pro Flächeneinheit dar (Index i vom engl. *incident*), so gelangt man zur einfallenden *Strahlungsflußdichte* E_i (englisch *irradiance*). Sie ist ein Maß für die gesamte auf eine Oberfläche auftreffende Strahlung und kann aus dem Integral der einfallenden Strahlendichte $L_i(\theta_i, \phi_i)$ über den Raumwinkel Ω gewonnen werden:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_i}{dA_i} \equiv E_i &= \int_{\Omega} L_i(\theta_i, \phi_i) d\Omega \\ &= \int_{\phi_i=0}^{\phi_i=2\pi} \int_{\theta_i=0}^{\theta_i=\pi/2} L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad . \end{aligned} \quad (2.3)$$

Die Einheit der Strahlungsflußdichte ist $[\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}]$. Sie kann ebenso wie die Strahlendichte mit dem Index λ indiziert werden, der Übersicht halber wird hier darauf verzichtet. Den Quotienten aus dem Integral über die von einer Probe reflektierte Strahlendichte L_r und der auf die Probe einfallenden Strahlungsflußdichte E_i bezeichnet man als *Albedo* ρ der Probe :

$$\rho = \frac{\int_{\Omega} L_r(\theta_r, \phi_r)}{E_i} \quad [\text{dimensionslos}] \quad . \quad (2.4)$$

Sie ist ein Maß für das Rückstrahlvermögen einer Probe. Die Albedo kann vom Einfallswinkel der einfallenden Strahlung abhängen, bei einer nicht selbsttätig strahlenden Probe gilt $0 < \rho < 1$.

2.1.2 Spektrale Reflexionsfunktion BRDF und Bikonischer Reflektanzfaktor BRF

Die Reflexion an einer Oberfläche kann man sich stark vereinfacht als aus den Idealfällen *Spiegelung* und *Lambert-Reflexion* zusammengesetzt vorstellen (siehe auch Abbildung 1.1). Die Spiegelung bewirkt eine wellenlängenunabhängige Reflexion dergestalt, daß Zenitwinkel von einfallender und reflektierter Strahlung übereinstimmen und der relative Azimutwinkel $\nu = \phi_i - \phi_r = 180^\circ$ beträgt. Bei diffuser Reflexion wird das Licht wellenlängen- und richtungsabhängig in alle Richtungen der oberen Halbkugel reflektiert. Von Lambert-Reflexion wird dann gesprochen, wenn unter beliebig kleinem Öffnungswinkel und unabhängig von dem Meßwinkel ϕ_i (mit θ_i konstant) die gleiche reflektierte Strahldichte L_r gemessen wird. Dabei verhält sich die Strahldichte L_r bei Änderung des Einfallswinkels θ_i proportional zum Kosinus desselben: $L_r \propto \cos \theta_i$. Manchmal wird zusätzlich noch die Wellenlängenunabhängigkeit bei Lambert-Reflexion gefordert.

Zur Beschreibung der diffusen Reflexion kann die spektrale Reflexionsfunktion BRDF (engl. *bidirectional reflectance distribution function*) herangezogen werden. Man beachte, daß es bei Feldmessungen aufgrund der Beleuchtungsverhältnisse nicht möglich ist, daß die einfallende Strahlung nur aus einer Richtung kommt. Sie ist immer eine Überlagerung aus Anteilen verschiedener Einfallrichtungen. Der auf ein infinitesimales Flächenelement dA einfallende Strahlungsfluß ist

$$d\Phi_i = L_i \cdot dA \cdot d\Omega_i \quad [\text{W}] \quad , \text{ mit } \Omega_i \text{ als projiziertem Raumwinkel.} \quad (2.5)$$

Aufgrund des Öffnungswinkel des registrierenden Sensors verhält es sich ebenso bei der reflektierten Strahlung. Ein Sensor, welcher aus der Richtung (θ_i, ϕ_r) auf die Fläche sieht, registriert den Strahlungsfluß

$$d\Phi_r = L_r \cdot dA \cdot d\Omega_r \quad [\text{W}] \quad , \quad (2.6)$$

wobei $d\Omega_r$ durch den Öffnungswinkel des Sensors bestimmt wird. Definiert man nun den Quotienten

$$X = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_i} = \frac{dL_r \, d\Omega_r}{dL_i \, d\Omega_i} \quad , \quad (2.7)$$

so erhält man eine dimensionslose Größe, welche invariant bezüglich L_i und $d\Omega_i$ ist (bei Verdoppelung der einfallenden Lichtmenge verdoppelt sich auch die ausfallende Lichtmenge). Sie ist aber nicht invariant gegenüber $d\Omega_r$, da diese Größe vom Meßgerät abhängt und nicht vom einfallenden Licht (eine Änderung von $d\Omega_r$ führt zu einer proportionalen Änderung von X). Dies führt zur Definition der spektralen Reflexionsfunktion f_r , welche nur für infinitesimale Öffnungswinkel gilt [Nicodemus 1970]:

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \, d\Omega_i} \quad \left[\frac{1}{\text{sr}} \right] \quad . \quad (2.8)$$

Diese kann nach Gl. 2.3 auch durch den von (θ_i, ϕ_i) abhängigen Teil dE_i der einfallenden Strahlungsflußdichte E_i definiert werden:

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad \left[\frac{1}{\text{sr}} \right] . \quad (2.9)$$

Die spektrale Reflexionsfunktion ist eine reine Materialeigenschaft der reflektierenden Fläche und von Beleuchtung sowie Apparategrößen unabhängig. Sie wird in der Literatur zumeist mit BRDF abgekürzt.

In der Praxis direkt meßbar ist nur der *Bikonische Reflektanz Faktor R* (BRF), da die Öffnungswinkel ω_i und ω_r endlich groß sind. Dieser wurde von Nicodemus wie folgt definiert:

$$R(\omega_i, \omega_r) = \frac{\pi}{\Omega_i \Omega_r} \int_{\omega_i} \int_{\omega_r} f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) d\Omega_r d\Omega_i . \quad (2.10)$$

Diese Größe ist dimensionslos, sofern π als Raumwinkel [sr] verstanden wird. In sehr guter Näherung (bis zu relativ großen Raumwinkeln, sofern sich die BRDF der untersuchten Oberfläche innerhalb der Raumwinkelelemente nur wenig ändert) gilt [Nic70]:

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{R(\omega_i, \omega_r)}{\pi} \quad \left[\frac{1}{\text{sr}} \right] . \quad (2.11)$$

Obwohl eigentlich nur Bikonische Reflektanzfaktoren gemessen werden können, werden im Folgenden die Meßwerte als BRDF-Werte bezeichnet.

2.2 Spiegelnde Reflexion und Polarisation

In Kapitel 5 wird zur Beschreibung des Reflexionsverhaltens ein Modell verwendet, in welchem ein Teil des gestreuten Lichtes auf das Prinzip der einfach spiegelnden Reflexion zurückgeführt wird. Die Beschreibung der spiegelnden Reflexion erfolgt dabei durch die *Fresnel Gleichungen*, welche die Reflexion (und Transmission) elektromagnetischer Wellen an der Grenzfläche zwischen verschiedenen Medien beschreibt.

Die zur Beschreibung notwendige Notation zeigt Abb. 2.2. Eine in der xy-Ebene liegenden Grenzfläche trennt zwei Medien mit Brechungsindizes \hat{m}_1 resp. \hat{m}_2 . Aus dem Medium 1 kommend fällt eine ebene Welle parallel zur Richtung \vec{P}_i auf diese Grenzfläche. Die Einfallrichtung bildet mit der Flächennormalen (parallel z-Achse) den Einfallszenitwinkel θ_i . Die einfallende Welle wird unter dem Ausfallszenitwinkel (bzw. Beobachtungszenitwinkel) θ_r in Richtung \vec{P}_r reflektiert, sowie in Richtung \vec{P}_t unter dem Brechungswinkel θ_t transmittiert.

Jeder Welle kann eine Ausbreitungsebene zugeordnet werden, welche durch ihre Ausbreitungsrichtung und der Flächennormalen definiert wird (in der Illustration liegen alle Ausbreitungsebenen in derselben Ebene, der Hauptebene). Abhängig von der Orientierung des elektrischen Feldvektors (\vec{E}_i, \vec{E}_r und \vec{E}_t) unterscheidet man dabei zwischen den *Polarisationsrichtungen* s und p . Die s -Komponente steht senkrecht zur Ausbreitungsebene,

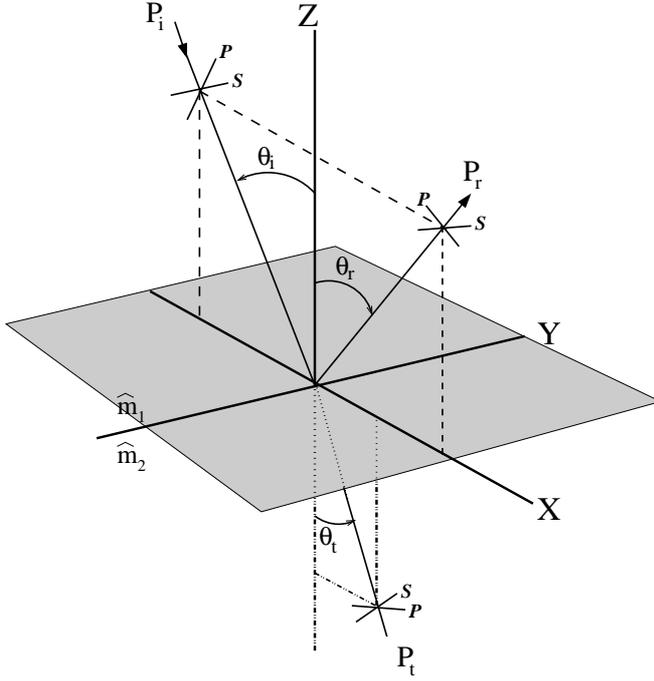


Abbildung 2.2: Illustration zur Reflexion und Transmission. Die Definition von s - und p -Polarisation im Bezug auf Einfalls- bzw. Streuebene erfolgt in Anlehnung an [Sto95].

Die s -Komponente steht immer senkrecht zur Ausbreitungsebene, welche durch den jeweiligen Ausbreitungsvektor und der Oberflächennormalen (hier z -Achse) aufgespannt wird. Die p -Komponente liegt immer in der Ausbreitungsebene.

die p -Komponente liegt in der Ausbreitungsebene (s ist also parallel zur Probenoberfläche (xy -Ebene)). Weitere übliche Bezeichnungen sind ' \perp ' für s und ' \parallel ' für p .

Basierend auf den Randbedingungen für elektromagnetische Felder¹ lassen sich sowohl *Snellius'sche Brechungsgesetz* als auch die *Fresnel Gleichungen* herleiten (eine ausführliche Darstellung ist z.B. in [Hap93] zu finden.) Die Fresnel Gleichungen geben das Verhältnis von reflektierter bzw. transmittierter zu einfallender Intensität in Abhängigkeit der Polarisationsrichtung sowie des Zenitwinkels θ an (man beachte, daß der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist: $\theta_i = \theta_r = \theta$). Bezeichnet man mit \hat{m} den relativen Brechungsindex zwischen den verschiedenen Medien der Brechungsindizes $\hat{m}_1 = n_1 + ik_1$ resp. $\hat{m}_2 = n_2 + ik_2$, also

$$\hat{m} = n + ik = \frac{\hat{m}_2}{\hat{m}_1} = \frac{n_1 n_2 + k_1 k_2 + i(n_1 k_2 - n_2 k_1)}{n_1^2 + k_1^2} \quad (2.12)$$

so daß

$$n = (n_1 n_2 + k_1 k_2) / (n_1^2 + k_1^2) \quad (2.13)$$

$$k = (n_1 k_2 + n_2 k_1) / (n_1^2 + k_1^2) \quad , \quad (2.14)$$

dann ergeben sich im Falle eines komplexen Brechungsindex \hat{m} für die Reflexionskoeffizienten R_{\perp} , R_{\parallel} bei s - bzw. p -Polarisation:

¹Stetigkeit der Komponenten von dielektrischer Verschiebung \vec{D} und magnetischer Induktion \vec{B} senkrecht, sowie der Komponenten von elektrischer und magnetischer Feldstärke \vec{E} bzw. \vec{H} parallel zur Grenzfläche.

$$R_{\perp} = |r_{\perp}|^2 = \frac{[\cos \theta - G_1^2]^2 + G_2^2}{[\cos \theta + G_1^2]^2 + G_2^2} \quad (2.15)$$

$$R_{\parallel} = |r_{\parallel}|^2 = \frac{[(n^2 - k^2) \cos \theta - G_1^2] + [2nk \cos \theta - G_2]^2}{[(n^2 - k^2) \cos \theta + G_1^2] + [2nk \cos \theta + G_2]^2} \quad (2.16)$$

mit

$$G_1^2 = \frac{1}{2} \left\{ [n^2 - k^2 - \sin^2 \theta] + [(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 k^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.17)$$

$$G_2^2 = \frac{1}{2} \left\{ -[n^2 - k^2 - \sin^2 \theta] + [(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 k^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.18)$$

Abbildung 2.3 zeigt exemplarisch den durch die Gleichungen 2.15 und 2.16 gegebenen Verlauf der Reflexionskoeffizienten für s - und p -Polarisation bei einem Brechungsindex $\hat{m} = 1.35 + i 1.25$.

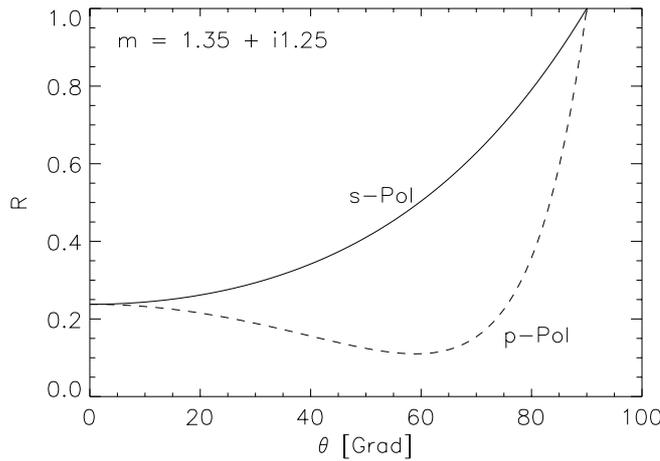


Abbildung 2.3: Fresnel Reflexionskoeffizienten R bei s - und p -Polarisation in Abhängigkeit vom Zenitwinkel θ (Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel). Der komplexe Brechungsindex beträgt in diesem Beispiel $\hat{m} = n + ik = 1.35 + i 1.25$.

Der Abbildung 2.3 ist zu entnehmen, daß das Reflexionsvermögen von der Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung und vom Einfallswinkel abhängt. Bei $\theta = 0^\circ$ (Einfall parallel zur Oberflächennormalen) ist das Reflexionsvermögen bei s - und p -Polarisation von gleichem Betrag. Bei senkrecht zur Hauptebene polarisiertem Licht (s -Polarisation) steigt das Reflexionsvermögen mit zunehmenden Einfallswinkel monoton bis zu einem Betrag von eins bei $\theta = 90^\circ$. Bei p -polarisierter Strahlung fällt das Reflexionsvermögen zunächst mit zunehmenden Einfallswinkel und steigt später ebenfalls bis zu einem Betrag von eins bei $\theta = 90^\circ$ (bei $\theta = 90^\circ$ fällt die Strahlung parallel zur Oberflächenebene ein). Man beachte, daß im Falle eines $k \neq 0$ das Reflexionsvermögen bei p -Polarisation stets ungleich Null ist. Im Fall von $k = 0$ sinkt das Reflexionsvermögen bei p -Polarisation bei einem bestimmten Winkel auf Null. Dieser Winkel wird als *Brewster Winkel* θ_B bezeichnet und berechnet sich nach $\tan \theta_B = n = n_2 / n_1$.

3 BRDF-Effekte in Luftbildern

Dieses Kapitel zeigt, inwieweit sich die Effekte der winkelabhängigen Reflexion (BRDF) von Oberflächen in multispektralen Luftbildern bemerkbar machen. Hierzu wurden im Jahr 1997 Befliegungen der nördlichen Region von Nürnberg zu verschiedenen Tageszeiten durchgeführt, wodurch sich unterschiedliche Beleuchtungswinkel für die aufgenommenen Gebiete ergeben. Weiterhin wurde der Verlauf der Flugstreifen so gewählt, daß diese sich teilweise kreuzen bzw. sich benachbarte Flugstreifen überlappen. Verschiedene Oberflächen wurden dadurch vom Sensor unter verschiedenen Scan- bzw. Beobachtungswinkeln aufgenommen.

Zu Beginn dieses Kapitels wird die Bestimmung der mit dem DAEDALUS gemessenen Reflektanzen beschrieben, ebenso wie die parallel zur Befliegung durchgeführte Bodenmessungen. Teile der Untersuchung sind auch in [RKS98] zu finden. Ebenfalls wird auf die Befliegungen der Jahre 1994 und 1995 eingegangen und ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den verschiedenen Jahren durchgeführt. Zum Ende des Kapitels werden BRDF-Effekte innerhalb des Befliegungsgebietes aufgezeigt.

3.1 Befliegungen und Bodenmessungen

Befliegungen der nördlichen Region von Nürnberg fanden u.a. in den Jahren 1994, 1995 und 1997 statt. Das Gebiet umfaßt neben dem Flughafen Teile eines Gewerbegebietes, Wohngebiete, landwirtschaftliche Nutzflächen (das 'Knoblauchland', ein traditionelles Gemüseanbaugebiet) sowie Teile eines Naturschutzgebietes. Geflogen wurde bei verschiedenen Flughöhen und im Jahr 1997 auch zu verschiedenen Tageszeiten. Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht zu den verschiedenen Befliegungen, die Abbildungen 3.1 und 3.2 zeigen eine Skizze der Flugstreifenverläufe. Als Sensor wurde der 11-Kanal Multispektralscanner DAEDALUS AADS 1268¹ verwendet, betrieben durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen.

Die Flugstreifen des Jahres 1994 entsprechen fast denen des Jahres 1995, weshalb beide in einer Übersichtsabbildung dargestellt werden (Abb. 3.1). Der Unterschied liegt lediglich in einer Erweiterung der Befliegung im Jahre 1995 um die Flugstreifen T11 u. T12. Die mit 'T' gekennzeichneten Flugstreifen bezeichnen in beiden Abbildungen eine Flughöhe von 300 m, die mit 'S' gekennzeichneten Flugstreifen bezeichnen in Abb. 3.1 eine Flughöhe von 1800 m und in Abb. 3.2 eine Flughöhe von 900 m.

¹Eine Kurzbeschreibung findet sich im Anhang A.1.

Datum	Zeit (UT) [hh:mm]	Flughöhe [m]	Flugstreifen (vgl. Abbildung 3.2)	Bemerkung
18.10.1994	11:12 - 11:45	300	T01 bis T10	
	11:57 - 12:17	1800	S02, S04, S06	
21.08.1995	09:47 - 10:36	300	T01 bis T12	
	10:43 - 10:55	1800	S02, S04, S06	
26.08.1997	03:25 - 04:02	900	S01* bis S06*	nur Thermalkanal
	06:57 - 07:50	300	T01* bis T11*	
	10:22 - 10:48	900	S01* bis S06*	
	11:01 - 11:51	300	T01* bis T11*	

Tabelle 3.1: Flugzeiten und \sim höhen der Nürnberg-Befliegungen in den Jahren 1994, 1995 und 1997. Die Flugstreifen des Jahres 1995 gleichen denen des Jahres 1994, T11 u. T12 wurden 1995 zusätzlich aufgezeichnet, sind in Abb. 3.1 der Übersicht halber nicht eingetragen. Die Flugstreifen des Jahres 1997 sind trotz der gleichen Bezeichnung nicht mit denen der Jahre 1994 bzw. 1995 vergleichbar und sind deshalb mit '*' gekennzeichnet.

An dieser Stelle sollte nochmals angemerkt werden, daß trotz der ähnlichen Kennzeichnung der Flugstreifen und der Wahl desselben Befliegungsgebietes (nördl. Stadtgebiet von Nürnberg) die Befliegung von 1997 zu denen der anderen Jahre verschiedene ist. Durch die Auslegung der Befliegung dergestalt, daß sich der Bildinhalt benachbarter Flugstreifen überlappt, ist ein Stadtteil unter mehreren Beobachtungswinkeln aufgenommen worden. Objekte, die z.B. in Flugstreifen T5 unter einem Beobachtungszenitwinkel von 0° aufgenommen wurden, erscheinen in den benachbarten Flugstreifen T4 bzw. T6 unter Zenitwinkeln von etwa $+40^\circ$ bzw. -40° . In Verbindung mit den zwei unterschiedlichen Zeitpunkten² der Befliegung ergeben sich im Idealfall damit sechs verschiedene Beleuchtungsgeometrien und es ist es möglich, BRDF-Effekte von verschiedenen städtischen Flächen zu untersuchen.

Parallel zu den Befliegungen wurden Bodenmessungen ausgewählter Flächen mit einem Feldspektrometer Typ IRIS³ durchgeführt⁴. Diese werden dazu genutzt, die gemessenen DAEDALUS-Daten zu rekalisieren und Genauigkeitsangaben zu den resultierenden DAEDALUS-Reflektanzen geben zu können.

²Wie aus Tabelle 3.1 ersichtlich, handelt es sich genaugenommen um Daten dreier Befliegungszeitpunkte. Die erste Befliegung fand vor Sonnenaufgang statt und zeichnete lediglich Daten im Thermalkanal auf, welcher in dieser Arbeit unberücksichtigt bleibt.

³Hersteller ist Geophysical & Environment Research Corp. (GER), One Bennett Common, Millbrook, NY 12545, USA

⁴1994 / 1995 von T. Kollwe [Kol96] in Zusammenarbeit mit dem Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen. 1997 von A. Rothkirch in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

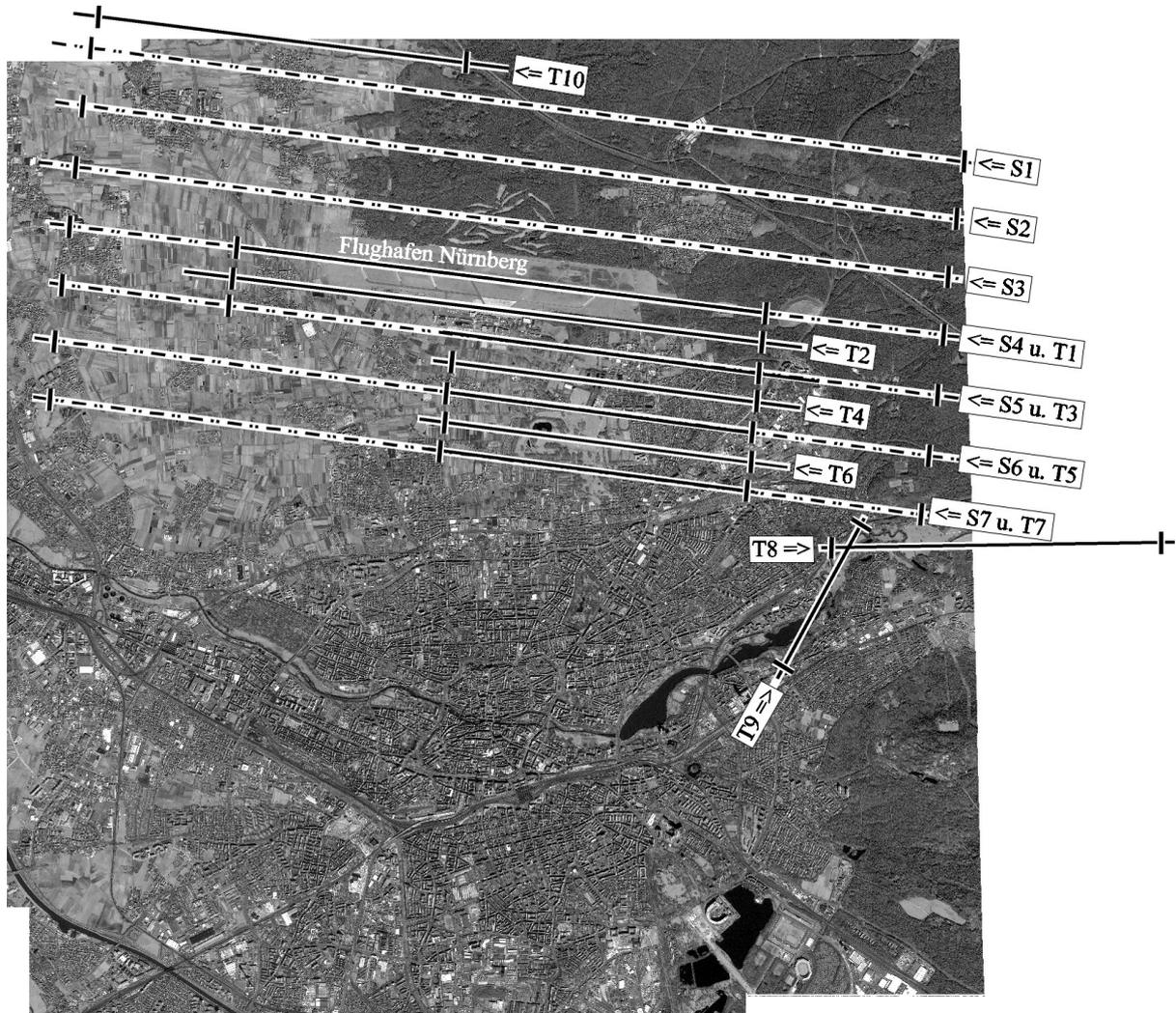


Abbildung 3.1: Befliegungsplan der Stadt Nürnberg für die Jahre 1994/95. Die mit 'T' beginnenden Flugstreifen wurden bei einer Flughöhe von 300 m durchgeführt, die mit 'S' gekennzeichneten Flugstreifen bei einer Flughöhe von 1800 m.

Als Orientierungshilfe sind der Flughafen sowie der Vorort 'Ziegelstein' namentlich gekennzeichnet, das unterlegte Bild wurde aus einer Aufnahme des IKONOS-2 Satelliten, Fa. Space Imaging, aus dem Jahre 2000 erstellt.

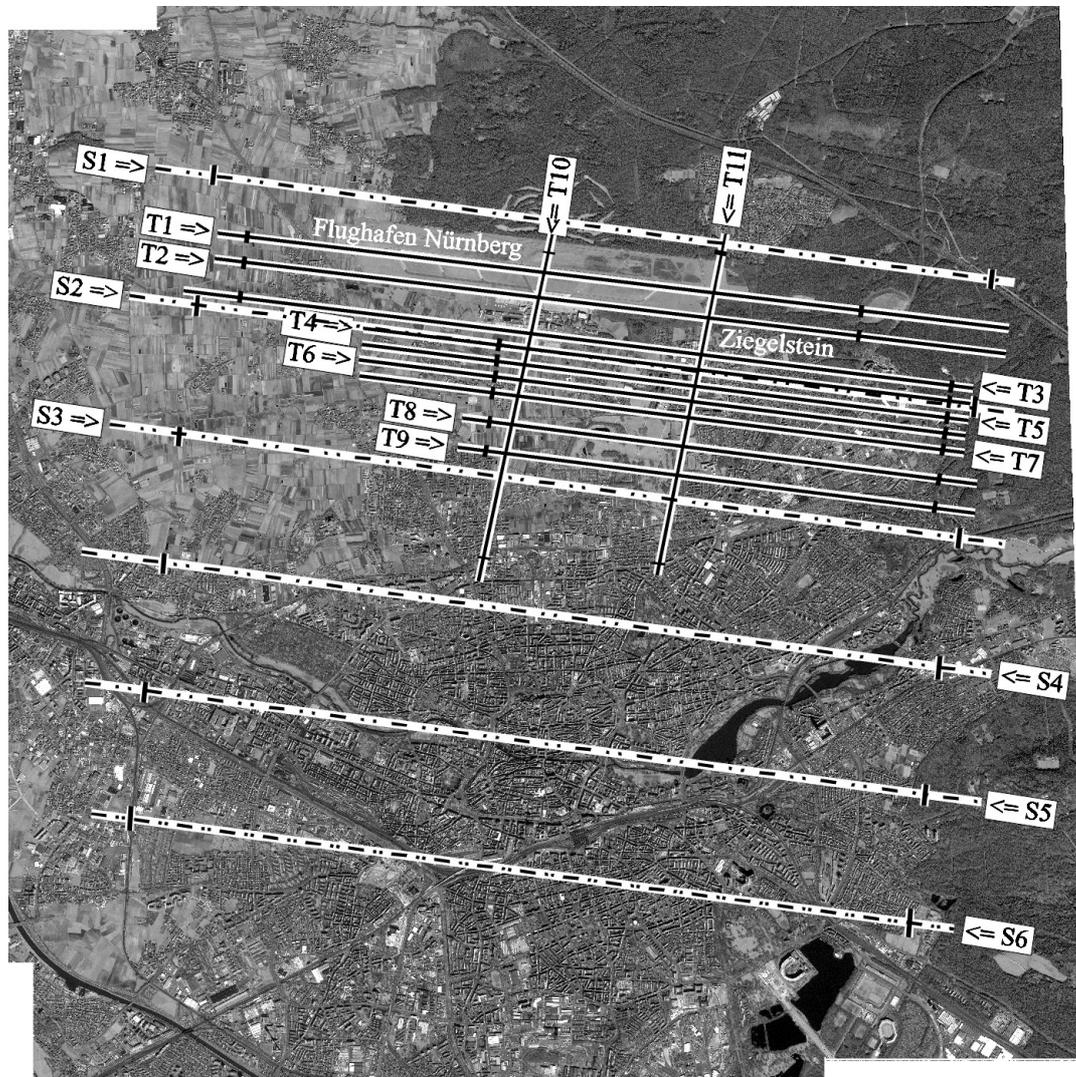


Abbildung 3.2: Befliegungsplan der Stadt Nürnberg für das Jahr 1997. Die mit 'T' gekennzeichneten Flugstreifen wurden bei einer Flughöhe von 300 m aufgenommen, die mit 'S' gekennzeichneten Flugstreifen bei einer Flughöhe von 900 m. Die Flugbahnen bei 300 m Flughöhe (T1, T2, T3 usw.) sind so gewählt, daß sich die aufgenommenen Flugstreifen überlappen. D.h. Objekte, die z.B. in Flugstreifen T5 unter einem Beobachtungszenitwinkel von 0° aufgenommen wurden, erscheinen in den benachbarten Flugstreifen T4 bzw. T6 unter Zenitwinkeln von etwa $+40^\circ$ bzw. -40° . Als Orientierungshilfe sind der Flughafen sowie der Vorort 'Ziegelstein' namentlich gekennzeichnet, das unterlegte Bild wurde aus einer Aufnahme des IKONOS-2 Satelliten, Fa. Space Imaging, aus dem Jahre 2000 erstellt.

3.1.1 Messung der Reflektanzen mit DAEDALUS

Die Bestimmung der mit dem DAEDALUS-Scanner gemessenen Bodenreflektanzen ρ_D erfolgt in zwei Schritten. Zum einen werden die für ein Bildelement (engl. *Pixel*) gemessenen Grauwerte durch eine im Labor durchgeführte Kalibration in Strahldichten $L_M(\theta_r)$ umgerechnet. Zum anderen werden für verschiedene Reflektanzwerte ρ_p Strahldichten $L_S(\theta_r, \rho_p)$ durch das Atmosphärenmodell SENSAT / MODTRAN [AKC⁺95],[Ric94] simuliert. Dieses simuliert für die festen Reflektanzwerte $\rho_p = 0\%$, 10% , 30% und 60% die am Detektor zu messenden Strahldichten $L_S(\theta_r, \rho_p)$ für verschiedene Beobachtungsbzw. Scanwinkel θ_r des DAEDALUS. Dabei werden neben Atmosphärenparametern (Radiosondenaufstieg) auch z.B. Sonnenstand, Flughöhe und spektrale Empfindlichkeit des Sensors in den verschiedenen Spektralkanälen berücksichtigt.

Die Reflektanz des Bildelements ρ_D wird anschließend durch Vergleich der tatsächlich gemessenen Strahldichte $L_M(\theta_r)$ und der simulierten Strahldichte $L_S(\theta_r, \rho_p)$ bestimmt (inverse Modellierung). Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise zur Bestimmung der Reflektanzen ρ_D siehe Abbildung 3.3. Nähere Erläuterungen sind in [Hep94] und [Ric94] zu finden.

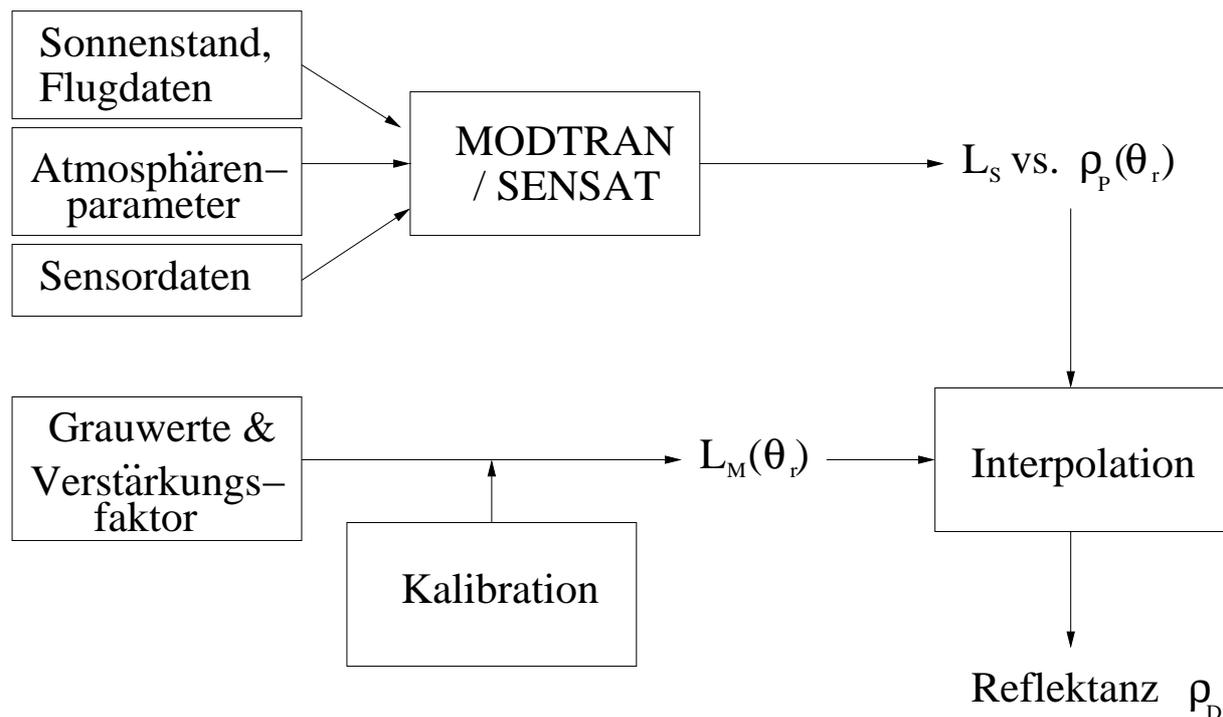


Abbildung 3.3: Vorgehensweise bei der Bestimmung der mit dem DAEDALUS gemessenen Reflektanzen ρ_D . Zum einen werden die gemessenen Grauwerte durch eine Kalibration in Strahldichten L_M umgerechnet. Zum anderen werden für festgelegte Reflektanzen ρ_p die an dem Sensor erwarteten Strahldichten $L_S(\theta_r, \rho_p)$ durch ein Atmosphärenmodell für die möglichen Beobachtungswinkel θ_r modelliert. Durch inverse Interpolation bestimmt man schließlich die Reflektanz ρ_D .

3.1.1.1 Kalibration und Detektorrauschen

Die Kalibration des DAEDALUS-Sensors wurde von der DLR nach der Überfliegung im Labor durchgeführt. Hierzu wurde der Sensor auf eine Kalibrationsbank montiert und durch eine homogene Lichtquelle (Ulbricht-Kugel) beleuchtet. Für die DAEDALUS-Scan-Frequenzen 12.5 Hz, 25 Hz, 50 Hz und 100 Hz wurden je 100 Scanzeilen aufgezeichnet. Weiterhin wurden Dunkelstrommessungen bei den genannten Scan-Frequenzen durchgeführt, ebenfalls über 100 Scanzeilen.

Der Kalibrationsfaktor C ist durch die lineare Beziehung zwischen Scanner-Signal D_{Cal} (abzüglich Dunkelstrom D_0) und der Strahldichte der Kalibrationsquelle L_{Cal} gegeben:

$$C = \frac{L_{Cal}}{D_{Cal} - D_0} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m Grauwert}} \right]. \quad (3.1)$$

Das Detektorrauschen des Scanners wurde durch die Standardabweichung der Dunkelstrommessungen σ_{D_0} bestimmt. Dieses wurde unter Verwendung des Kalibrationsfaktors C in ein dem Detektorrauschen entsprechendes 'Strahldichte-Rausch-Äquivalent' L_{NE} umgerechnet (*noise equivalent radiance*):

$$L_{NE} = C \cdot \frac{\sigma_{D_0}}{\gamma} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}} \right], \quad (3.2)$$

γ bezeichnet darin den bei der Dunkelstrommessung verwendeten Verstärkungsfaktor. Für die Befliegungen 1994, 1995 und 1997 zeigt Abbildung 3.4 das Detektorrauschen für die Kanäle 1 bis 10 des DAEDALUS-Scanners in Abhängigkeit von der Scanfrequenz (unterschiedliche Scanfrequenzen werden für unterschiedlichen Flughöhen benötigt). Es ist zu erkennen, daß der Kanal 1 mit Abstand das höchste absolute Rauschen aufweist, gefolgt von den Kanälen 9 und 4. Weiterhin ist zu sehen, daß das Detektorrauschen der einzelnen Kanäle mit steigender Scanfrequenz zunimmt.

Abhängig von der Beleuchtung, der verwendeten Scanfrequenz sowie der Größe der Reflektanz am Boden ergibt sich ein unterschiedlich starker relativer Fehler bedingt durch das Detektorrauschen. Abbildung 3.5 zeigt den relativen Fehler σ_{RAUSCH} für verschiedene Aufnahmebedingungen anhand der Daten von 1997. Das zu erwartende Meßsignal entstammt den Atmosphärensimulationen für unsere Befliegung 1997. Teilabbildung 1 zeigt den relativen Fehler bei verschiedenen Reflektanzen für eine morgens (ca. 9 Uhr Ortszeit) durchgeführte Befliegung bei 300 m Flughöhe. Teilabbildung 2 stellt die Größe des Fehlers zur Mittagszeit bei einer Flughöhe von 300 m dar (ca. 13 Uhr Ortszeit). Aufgrund der größeren einfallenden Strahlungsflußdichte wird auch mehr von der Oberfläche reflektiert. Dadurch sinkt der durch das Detektorrauschen bedingte relative Fehler im Meßsignal gegenüber der morgendlichen Befliegung auf etwa die Hälfte. Teilabbildung 3 zeigt den relativen Fehler für eine Befliegung zur Mittagszeit bei 900 m Flughöhe. Obwohl die Beleuchtungsbedingungen fast identisch mit denen aus Teilabbildung 2 sind (der Unterschied in der Flughöhe kann in erster Näherung vernachlässigt werden), verringert sich der relative Fehler nochmals deutlich. Die Ursache liegt darin begründet, daß bei einer Flughöhe von 900 m eine geringere Scanfrequenz verwendet wird als bei einer Flughöhe von 300 m.

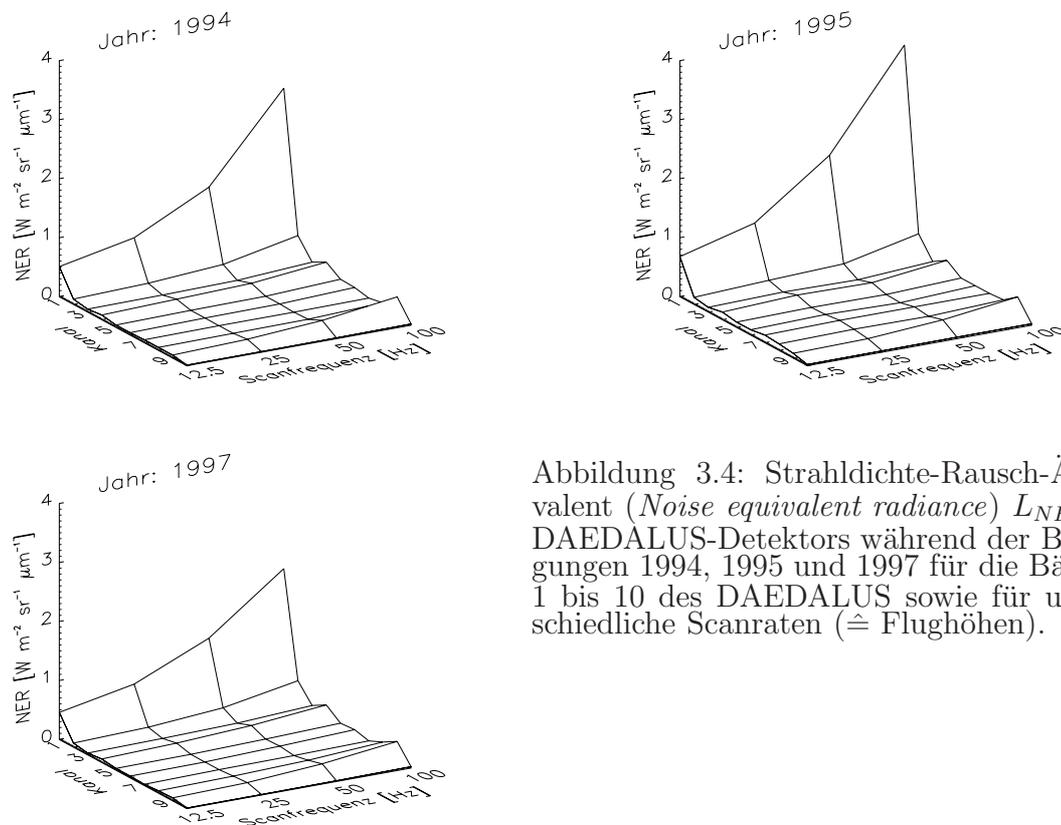


Abbildung 3.4: Strahldichte-Rausch-Äquivalent (*Noise equivalent radiance*) L_{NE} des DAEDALUS-Detektors während der Befliegungen 1994, 1995 und 1997 für die Bänder 1 bis 10 des DAEDALUS sowie für unterschiedliche Scanraten ($\hat{=}$ Flughöhen).

Die daraus resultierende längere Belichtungszeit des Detektors hat ein geringeres Detektorrauschen zur Folge (vgl. Abb. 3.4). Bei angenommenen Bodenreflektanzen von 10%, 30% und 60% und als Mittel über alle Kanäle ändert sich das relative Detektorrauschen von 2,4% bei der morgendlichen Befliegung auf 1,1% bei der mittäglichen Befliegung (100 Hz Scanrate in beiden Fällen). Dieses reduziert sich auf 0,4% bei Verwendung einer Scanrate von 33,3 Hz zur Mittagszeit.

3.1.1.2 Unsicherheit durch ungenügende Kenntnis der Atmosphärenparameter

Die Gewinnung von genauen Informationen über lokale atmosphärische Parameter ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Häufig erhält man lediglich Schätzungen über Sichtweite sowie Messungen von Luftdruck oder Luftfeuchte aus Radiosondendaten von 'nahegelegenen' Wetterstationen. Schätzungen⁵ für die 1997 durchgeführte Befliegung stammen von der Wetterstation auf dem Flughafen Nürnberg. Zusätzlich wurden Höhenprofile des Luftdrucks, der Luftfeuchte sowie der Temperatur eines Radiosondenaufstiegs bei Amberg (etwa 60 km östlich von Nürnberg) verwendet.

⁵Die Sichtweite wird z.B. anhand von Landmarken abgeschätzt, d.h. nach Einteilungen wie 'falls Kirchturm x noch zu erkennen ist, dann beträgt die Sichtweite y km'.

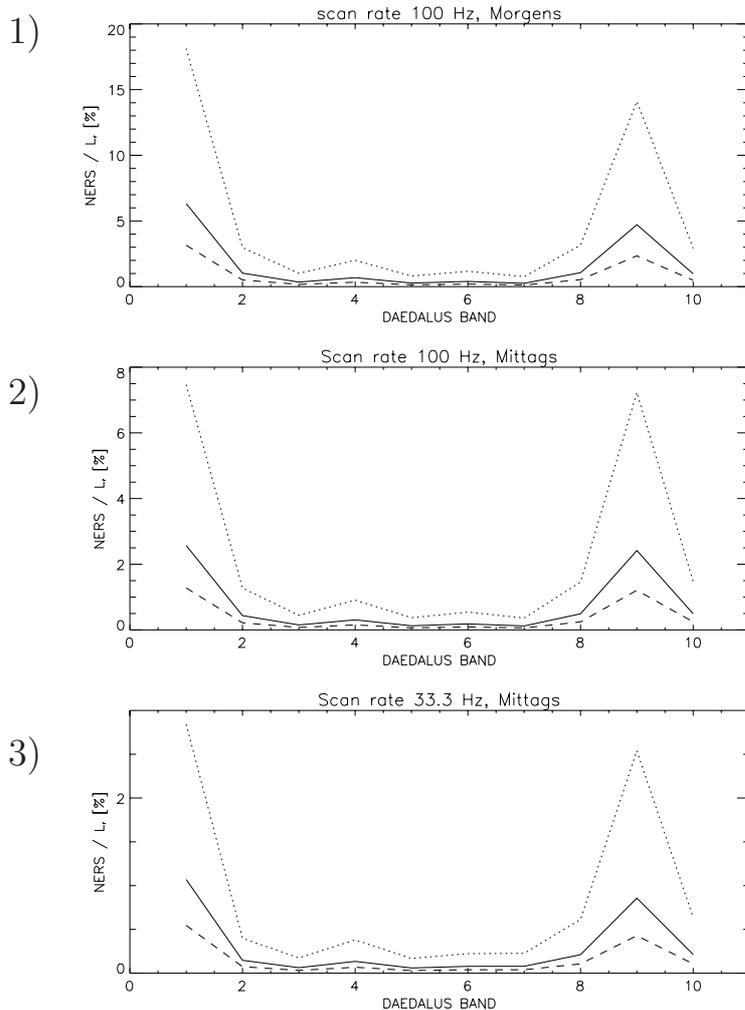


Abbildung 3.5: Relativer Fehler des Meßsignals aufgrund des Detektorrauschens für verschiedene Tageszeiten und Flughöhen. Teilabbildung 1 zeigt den Anteil bei einer Flughöhe von 300 m bei einer morgendlichen Überfliegung. Die Teilabbildungen 2 und 3 geben die relative Fehlergröße zur Mittagszeit an. In Teilabbildung 2 beträgt die Flughöhe 300 m (dadurch beträgt die Scanfrequenz-Frequenz 100 Hz) und 900 m in Teilabbildung 3.

Bei der gepunkteten Linie beträgt die Bodenreflektanz 10 %, bei der durchgezogenen Linie 30 % und bei der gestrichelten Linie ist die Reflektanz 60 %. Man beachte die unterschiedlichen Skalen der Ordinaten.

Um den Fehler der Reflektanzwerte aufgrund der Unsicherheit der atmosphärischen Parameter abschätzen zu können, wurden mehrere Durchläufe des Atmosphärenmodells MODTRAN/SENSAT mit verschiedenen Parametersätzen durchgeführt. Die Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel entsprechen der Beleuchtungsgeometrie einer der Flugstreifen und können als allgemein typisch für Befliegungen zur Mittagszeit angesehen werden (Flugrichtung (*heading*) 195°; Sonnenzenit 39.34°; Sonnenazimut 173.47°; Flughöhe 300 m)⁶. Unter der Annahme eines städtischen Aerosoltyps wurde die Sichtweite für verschiedene Atmosphärentypen ('Mittlere Breiten, Sommer'[MFS⁺72], 'US Standard' und 'Sonde Amberg') von 10 bis 30 km variiert und die am Detektor zu messende Strahldichte für die DAEDALUS-Kanäle modelliert. Abbildung 3.6 zeigt die mit dem DAEDALUS zu messende Strahldichte einer Bodenfläche mit einer Reflektanz von 10 %, bei a) Variation der Sichtweite von 10 bis 30 km (bei Atmosphärentyp 'Sonde Amberg') und

⁶Beachte: Der DAEDALUS-Scanner beobachtet senkrecht zur Flugrichtung, d.h. die Beobachtung erfolgt senkrecht zur Hauptebene.

b) verschiedenen Atmosphärentypen bei einer Sichtweite von 15 km. Die rechte Teilabbildung zeigt die relative Abweichung bei Berücksichtigung der Abweichungen zwischen den Atmosphärentypen und dem Unterschied zwischen 15 und 20 km Sichtweite bei den Daten 'Sonde Amberg' (quadratische Addition der Standardabweichungen).

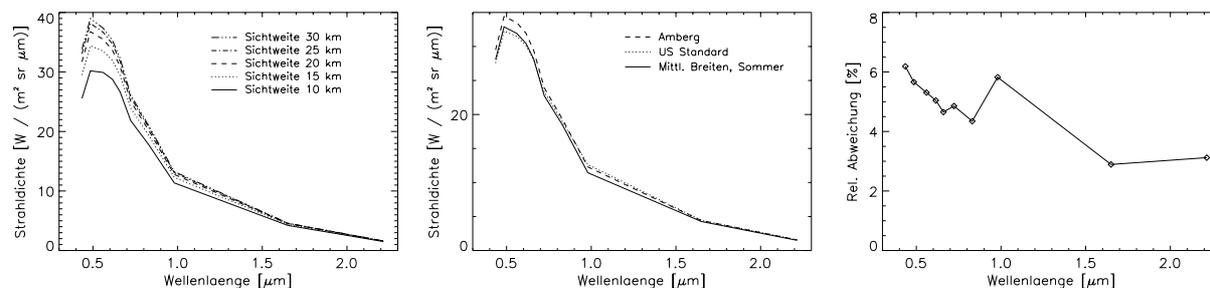


Abbildung 3.6: Unterschiede in der am DAEDALUS-Sensor erwarteten Strahlendichte für eine vorgegebene Bodenreflektanz von 10% und städtischem Aerosoltyp bei Sichtweiten zwischen 10 bis 30 km unter Verwendung der Daten 'Sonde Amberg' (linke Abb.); bei Atmosphärentypen 'Mittlere Breiten, Sommer', 'US Standard' und 'Sonde Amberg' bei einer Sichtweite von 15 km (mittlere Abb.); erwartete relative Unsicherheit bei Berücksichtigung der Abweichungen zwischen den Atmosphärentypen und dem Unterschied zwischen 15 und 20 km Sichtweite bei den Daten 'Sonde Amberg' (rechte Abb.).

Für ein anschaulichere Darstellung sind die Teilergebnisse durch Linien dargestellt, welche die korrespondierenden Ergebnisse der zehn DAEDALUS-Kanäle miteinander verbinden (vgl. rechte Teilabbildung).

Je nach Wellenlänge ergeben sich relative Unsicherheiten zwischen 6% und 3%. Die Unsicherheit wird tendenziell mit zunehmender Wellenlänge kleiner und ist durch die Abhängigkeit von Streuprozessen von der Wellenlänge λ plausibel (z.B. Rayleigh-Streuung $\propto \lambda^{-4}$). Größere Abweichungen von dieser Tendenz treten dann auf, wenn die spektrale Empfindlichkeit⁷ eines DAEDALUS-Kanals Absorptionsbanden der Atmosphäre überdeckt. So wird z.B. der Kanal 8 ($\approx 0.9-1.05 \mu\text{m}$) durch den Feuchtegehalt der Atmosphäre beeinflusst - es finden sich H_2O -Absorptionsbande (Isotop H^{16}OH) u.a. bei 942.2 und 976.7 nm.

Wir nehmen an, daß Abb. 3.6 eine untere Grenze der systematischen Unsicherheit aufgrund von Atmosphärenbedingungen darstellt, da wir keine Möglichkeit hatten, z.B. die Aerosolverteilung (als 'städtisch' angenommen) zu prüfen.

3.1.1.3 Vorläufige Fehlerbetrachtung der DAEDALUS-Reflektanzen

Die Fehlerfortpflanzung erlaubt die Bestimmung des Fehlers der resultierenden Reflektanzwerte, wenn die Fehler der verwendeten Strahlendichten (Strahlendichte L_M aus Messung, L_S aus Modell) bekannt sind (= Ergebnisse der Kapitel 3.1.1.1 und 3.1.1.2). Diese liefert einen

⁷Die spektralen Empfindlichkeiten des von uns verwendeten DAEDALUS-Sensors sind in Abb. A.2 angegeben.

relativen Fehler der Reflektanz von 4.3% (Extrema sind 2.1 % und 7.1%), gemittelt über Reflektanzwerte von 5, 10, 15 und 20 % sowie alle DAEDALUS-Kanäle. Dieser Wert sollte als grober Richtwert der Genauigkeit der pixelbasierten Reflektanz betrachtet werden. Die Fehlerangabe beinhaltet nicht mögliche Unterschiede in der Kalibration zwischen Labormessung und Befliegung, [Hep94] hat größere Abweichungen der Kalibrationskoeffizienten beschrieben. Diese Abweichungen wurden zwar für einen deutlich größeren Zeitraum als den zwischen der Laborkalibration (am 29.08.97) und der Befliegung (am 26.08.97) gefunden, können aber ebenfalls durch Auf-/Abbau des Sensors bedingt sein. Des Weiteren ist nicht bekannt, wie groß die Unsicherheiten der für das Leuchtdichtenormal angegebenen absoluten Strahldichten sind. Als Anhaltspunkt kann die mittlere Abweichung einer Absoluteichung einer Ulbricht-Kugel der DLR in Adlershof durch verschiedene internationale Eichbehörden gesehen werden, welche etwa 5 % entspricht [Bet96]. Zudem können Verschleißerscheinungen oder Wartungsarbeiten (im Extremfall z.B. ein Wechsel der Lampe in der Ulbricht-Kugel) zu systematischen Veränderungen der Strahldichtecharakteristik führen.

Erwähnt werden sollte ebenfalls, daß für bestimmte Anwendungen (z.B. unüberwachte Klassifikation) die Kenntnis von absoluten Reflektanzwerten nicht notwendig ist, sodaß für diese die Unsicherheit der Grauwerte innerhalb eines Bildes (bestimmt durch das Detektorrauschen) ausschlaggebend ist. Die relativen Unterschiede zwischen den Grauwerten innerhalb eines Flugstreifens können detektorbedingt zusätzlich durch systematische Unsicherheiten größer ausfallen (siehe folgendes Kapitel). Zu bedenken ist auch, daß Unsicherheiten der Reflektanz durch Inhomogenitäten der Oberfläche in den meisten praktischen Anwendungen eine Rolle spielen (Mischpixel und Textur der Oberfläche) [SAME00].

3.1.1.4 Winkelabhängigkeit des DAEDALUS-Detektors

Winkelabhängige Effekte in Luftbildern können einerseits durch BRDF-Effekte hervorgerufen werden, zum anderen aber auch durch das Funktionsprinzip des Sensors. Beim Zeilenscanner DAEDALUS AADS 1268 gelangt das einfallende Licht u.a. über einen rotierenden Spiegel in die einzelnen Detektoren (vgl. A.1). Zeigt dieser Abweichungen gegenüber der vorgegebenen Rotationsachse, so kann dies zu einer Abhängigkeit des detektierten Signals vom Scanwinkel führen. Weiterhin können auch Streulichteffekte das Detektorsignal verfälschen, mit welchen häufig auch noch eine Abhängigkeit von der Wellenlänge einhergeht.

Damit BRDF-Effekte in Luftbildern auch als solche erkannt werden können, müssen die Bilder auf eine mögliche Winkelabhängigkeit des Sensors korrigiert werden. Dies kann z.B. durch Labormessungen geschehen, indem man den Sensor mit einer Ulbrichtkugel als Beleuchtungsquelle betreibt. Für den DAEDALUS-Scanner ergaben sich im Jahr 1994 relative Abweichungen vom erwarteten Signal von größtenteils unterhalb 3 % [TRR⁺96]. Eine Ausnahme bildete Kanal 1 mit Abweichungen bis 15 %. Die ebenfalls 1997 durchgeführte Labormessung liegt aufgrund von technischen Schwierigkeiten nicht vor, weshalb die Winkelabhängigkeit des DAEDALUS-Detektors für 1997 direkt aus den Luftbildern bestimmt wurde [MJRS99]. Aus dem direkten Vergleich von zwei Flugstreifen, bei denen

die Startbahn des Nürnberger Flughafens einmal im Nadir und einmal unter dem vollen Scanwinkel beobachtet wurde, zeigt sich für 1997 eine deutlich stärkere Winkelabhängigkeit als im Jahr 1994 (vgl. Abb. 3.7). Die relativen Abweichungen sind kanalabhängig und erreichen zwischen 5.3 % und 13.5 %. Im Mittel liegen sie bei 10.6 %. Das zu untersuchende Bildmaterial wurde auf diese Winkelabhängigkeit korrigiert.

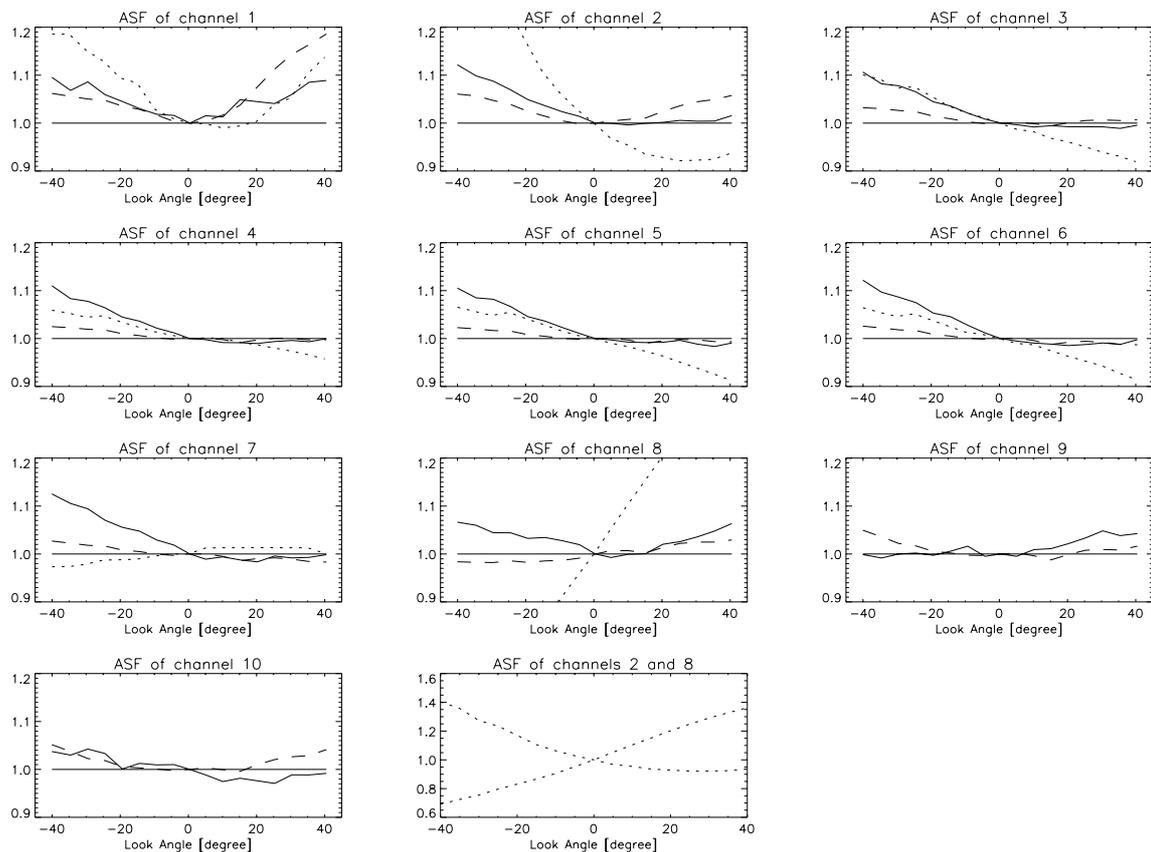


Abbildung 3.7: Normalisierte Winkelabhängigkeit ASF des DAEDALUS-Detektors der Kanäle 1 bis 10 in Abhängigkeit vom Scanwinkel. Die durchgezogene Linie bezeichnet die ASF von 1997, welche aus den Bilddaten bestimmt wurde. Als Vergleich die durch Labormessungen bestimmte ASF für das Jahr 1994 (gestrichelte Linie) und die ASF für die Kanäle 1 bis 8 eines in Australien betriebenen DAEDALUS-Scanners (gepunktete Linie, ebenfalls durch Labormessungen bestimmt). Der letzte Teilplot zeigt nochmals die ASF der Kanäle 2 und 8 des in Australien betriebenen DAEDALUS, jedoch mit anderem Maßstab [MJRS99].

3.1.1.5 Überstrahlungseffekt

Für Oberflächen geringer räumlicher Ausdehnung (kleiner als 7×7 Bildpunkte) sowie an den Kanten zweier aneinander grenzender Oberflächen wird die im Detektor gemessene

ne Strahldichte eines Bodenpunktes durch die räumlich benachbarten Bodenpunkte beeinflusst. Insbesondere für Oberflächen geringer Reflektanz, welche durch hoch reflektive Oberflächen umgeben sind (z.B. eine von Bäumen umgebene Wasserfläche oder an Asphalt angrenzende Vegetation wie am Flughafen), sind die Beiträge der Umgebung an der im Detektor gemessenen Strahldichte nicht vernachlässigbar [Ric97]. Die Ursache dafür sind Streueffekte auf dem Weg vom Boden zum Sensor. Bei einem Vergleich der Reflektanzbilder einer Flughafenszene mit und ohne Korrektur auf den Überstrahlungseffekt (zur Korrektur siehe [Ric92, Hep94]) fanden wir relative Änderungen in den Reflektanzwerten von weniger als 1 % für $\approx 50\%$ der Bildpunkte, Änderungen kleiner als 7 % betreffen 90 % der Bildpunkte. Die Anzahl der Pixel mit relativen Änderungen der Reflektanz von mehr als 20 % betrug nur 1.5 % aller Bildpunkte der Testszene. Das Ergebnis zeigt, daß eine Korrektur der Bilder notwendig ist und daher auch durchgeführt wurde.

3.1.2 Bodenmessungen mit dem Spektroradiometer

Parallel zu der Befliegung im Jahre 1997 wurden Bodenmessungen ausgewählter Flächen mit einem Spektrometer (Typ IRIS Mark IV der Fa. Geophysical & Environmental Research Corp. (GER),USA) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, durchgeführt. Diese werden in Kap. 3.1.4 für die Rekalibrierung der aus den DAEDALUS-Daten gewonnenen Reflektanzen verwendet. Die Reflektanzen der gewählten Flächen wurden in den Jahren 1994 und 1995 ebenfalls mit einem IRIS-Gerät der DLR Oberpfaffenhofen gemessen [Kol96]. Dadurch ist eine vergleichbare Vorgehensweise bei der Erstellung der Reflektanzbilder der verschiedenen Jahre gewährleistet und Aussagen über die langfristige Eignung der Oberflächen als Referenzfläche werden ermöglicht. Im folgendem werden die einzelnen Meß- und Auswerteschritte beschrieben

- die Meßorte
- Funktionsweise des IRIS
- Berechnung von Reflektanzspektren und Detektorfunktion
- Kalibrierung und Bestimmung des Detektorrauschens
- Vergleich der Bodenmessungen für drei Jahre

Abbildung 3.8 zeigt die Position der gewählten Meßpunkte⁸ auf einem Luftbild. Die Bezeichnung erfolgt durch die Nummern 1 bis 6. Zur besseren Anschauung der Meßpunkte sowie ihrer Oberflächenbeschaffenheit wurden ebenfalls Photos aufgenommen (Abb. 3.9

⁸Die Meßorte 1 und 2 waren nach Abstimmung mit der Flughafensicherheit zugänglich. An Meßort 2 kann im Prinzip über den gesamten Tag hinweg gemessen werden. Meßort 1 liegt im Bereich des Flugverkehrs. Für unsere kurzzeitigen Messungen (max. 20 Minuten einschließlich Auf-/Abbau) leitete die Flugsicherheit den Betrieb kurzfristig um. Für die freundliche und zuvorkommende Behandlung seitens des Flughafens Nürnberg an dieser Stelle nochmals meinen herzlichen Dank.



Abbildung 3.8: Meßorte der Bodenmessungen, es bezeichnen

- 1 : Flughafenvorfeld
- 2 : Asphalt Flughafen
- 3 : Tennisplatz
- 4 : Kunstrasen - Fußballfeld
- 5 : Asphalt Gewerbegebiet
- 6 : Naturrasen - Fußballfeld

bis 3.14). Diese sind aufgrund der Entwicklung im Photolabor zwar nicht unbedingt farbtreu (und hier deshalb auch nur schwarz-weiß dargestellt), verdeutlichen jedoch die Eigenheiten eines Meßpunktes. Diese können zu Unterschieden in der gemessenen Reflektanz zwischen DAEDALUS-Scanner und IRIS-Spektrometer (oder auch zwischen den IRIS-Messungen verschiedener Jahre) führen, hierzu einige Anmerkungen:

Meßort 1 (Flughafenvorfeld, Abb. 3.9): Das Vorfeld macht einen sehr homogenen Eindruck, konnte aus Sicherheitsgründen aber in seiner Gesamtheit nicht näher untersucht werden. Große Unterschiede im Vorfeld (z.B. neuer / alter Belag wie im Jahr 1995, [Kol96]) sind 1997 nicht zu erkennen. Neben einigen Stellen mit Gummiabrieb sind auf dem Vorfeld noch gelbe Fahrbahnmarkierungen sichtbar. Weiterhin ist deutlich zu erkennen, daß das Vorfeld eine Vorzugsrichtung aufweist (Rillen im Vorfeld, rechte Grafik Abb. 3.9).

Meßort 2 (Asphalt Flughafen, Abb. 3.10): Die Asphaltfläche grenzt an das Flughafenvorfeld und ist gut zugänglich. Die Fläche liegt in einem wenig frequentierten Bereich des Flugbetriebes und ermöglichte auch den längeren Aufenthalt für durchzuführende Messungen. Durch die angrenzende Lage an das Vorfeld kann auf einen aufwendigen Auf- und Abbau des Bodenspektrometers zwischen der Messung verschiedener Probenflächen verzichtet werden, wodurch direkt parallel zu einem Überflug sowohl eine helle Fläche als auch eine dunkle Fläche gemessen werden können (zwei Messungen sind für die Bestimmung einer linearen Transformationsfunktion mindestens nötig; diese sollten zudem einen möglichst großen Reflektanzunterschied aufweisen). In Kauf genommen werden muß dafür



Abbildung 3.9: Meßort 1: Flughafenvorfeld. Die linke Abbildung zeigt einen Teil des Flughafenvorfeldes des Nürnberger Flughafens im Jahr 1997. Außerdem zu sehen ist J. Ruder, Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover beim Vorbereiten des IRIS-Spektroradiometers für eine Bodenmessung. Im Bildhintergrund (am rechten Bildrand) erkennt man den Meßort 2 'Asphalt Flughafen'. Die rechte Abbildung zeigt eine Nahaufnahme der Vorfelddoberfläche mit deutlich zu erkennenden Vertiefungen (Rillen).

die kleine räumliche Ausdehnung der Asphaltfläche, welche die Eignung als Referenzfläche in Luftbildern aufgrund von Überstrahlungseffekten einschränken kann (oberhalb einer Pixelbreite in den Luftbildern von etwa 3 m gewinnt die Korrektur auf Überstrahlung für diese Fläche zunehmend an Bedeutung). Erwähnt werden sollte noch, daß zwischen den Asphaltflächen des Flughafens und des Industriegebietes (Meßpunkte 5, vgl. Abb. 3.13) ein Unterschied in der Körnung besteht. Mögliche Unterschiede im Reflektanzspektrum könnten, abgesehen von der chemischen Zusammensetzung, hierauf zurückzuführen sein.



Abbildung 3.10: Meßort 2: Asphalt Flughafen. Die linke Abbildung zeigt einen Teil der Asphaltfläche am Flughafen Nürnberg, die rechte Grafik eine Nahaufnahme der Oberfläche. Am linken Bildrand der rechten Grafik sieht man Mitglieder unserer Arbeitsgruppe bei der Vorbereitung von BRDF-Messungen von Asphalt [MWM⁺98, Mon98].

Meßort 3 (Tennisplatz, Abb. 3.11): Reflektanzspektren vom Tennisplatz wurden sowohl im Jahr 1994 als auch im Jahr 1995 gemessen⁹. Das Spektrum zeigt eine breite Abdeckung von Reflektanzwerten und würde sich vom Spektralverlauf als geeigneter Kandidat für Bodenmessungen eignen. Allerdings zeigt die Fläche auch im 1/2 m-Bereich deutliche sichtbare Variationen in der Oberflächenbeschaffenheit, was einen größeren Meßaufwand (viele Stützstellen) erfordert. Dadurch wird das Messen verschiedener Oberflächen direkt parallel zu einer Befliegung behindert. Desweiteren wird die Anlage an heißen Sommertagen mit Wasser benetzt (siehe Sprinkleranlage linke Grafik von Abb. 3.11, rechter Bildrand), wodurch die Vergleichbarkeit von Spektren bei einem Zeitversatz zwischen Befliegung und Bodenmessung in Frage gestellt werden kann.



Abbildung 3.11: Meßort 3: Tennisplatz. Übersicht (linke Abbildung) und Nahaufnahme (rechte Abbildung) vom Tennisplatz. Die zur Befeuchtung des Platzes eingesetzte Sprinkleranlage (rechter Bildrand in der linken Grafik) behindert den Vergleich von Spektren zwischen DAEDALUS und IRIS, wenn diese nicht gleichzeitig gemessen wurden.

Meßort 4 (Kunstrasen, Abb. 3.12): Die Kunstrasenfläche macht einen sehr homogenen Eindruck und ist ohne große Schwierigkeiten zugänglich¹⁰. Ebenso wie Meßort 3 wird auch die Kunstrasenfläche durch Wassersprinkler bewässert und erschwert die Vergleichbarkeit der gemessenen Spektren zwischen Luft- und Bodenmessung bei Zeitversatz. Zudem bildet sich Moos o.ä. zwischen den Kunststoffasern wodurch die Eignung der Kunstrasenfläche als längerfristige Referenzfläche allein schon aufgrund der vegetativen Veränderungen hinterfragt werden muß.

Meßort 5 (Asphalt Gewerbegebiet, Abb. 3.13): Die Asphaltfläche liegt etwas abseits im Gewerbegebiet Andernacher Straße und ist gut zugänglich. Obwohl es sich bei dieser Fläche um eine vom öffentlichen Verkehr genutzte Fläche handelt, konnten die Messungen relativ ungestört durchgeführt werden. Durch ihre rechteckige Form bietet sie gute Anhaltspunkte zum Wiedererkennen der Lage der Meßpunkte in den Flugstreifen.

⁹Aus technischen Gründen (fehlerhafte Aufzeichnung) liegt kein Reflektanzspektrum für das Jahr 1997 vor.

¹⁰Im Gegensatz zu den eigentlich bestens geeigneten Dachflächen im Gewerbegebiet. Der Zugang wird in der Regel aus versicherungsrechtlichen Gründen nicht gestattet.



Abbildung 3.12: Meßort 4: Kunstrasen. Übersicht (linke Abbildung) und Nahaufnahme (rechte Abbildung) der Kunstrasenfläche. Ebenso wie der Tennisplatz wird auch die Kunstrasenfläche durch Wassersprinkler bewässert und erschwert/verhindert die Vergleichbarkeit von Messungen bei Zeitversatz.



Abbildung 3.13: Meßort 5: Asphalt Gewerbegebiet. Übersicht (linke Abbildung) und Nahaufnahme (rechte Abbildung) der Asphaltfläche im Gewerbegebiet 'Andernacher Straße', Nürnberg. In der Bildmitte der linken Grafik sieht man das IRIS-Spektrometer mit Stromversorgung sowie die auf dem Asphalt liegende BaSO_4 -Referenzfläche.

Meßort 6 (Naturrasen, Abb. 3.14): Die Naturrasenfläche ist sehr inhomogen. Neben grasgrünen Stellen sind auch vertrocknete Stellen zu erkennen. Trotz des extremen Sommerwetters im Vorfeld der Meßkampagne sind auch 'saftig-grüne' Rasenstellen zu erkennen. Diese sind auf die künstliche Bewässerung der als Fußballplatz genutzten Rasenfläche zurückzuführen (Pflege durch den Platzwart). Aufgrund der Inhomogenitäten wurde an verschiedenen Stellen der Rasenfläche (grüne bzw. vertrocknete Fläche) ein Spektrum gemessen.



Abbildung 3.14: Meßort 6: Naturrasen. Übersicht (linke Abbildung) und Nahaufnahme (rechte Abbildung) der Naturrasenfläche. Aufgrund der starken Inhomogenitäten wurde an verschiedenen Stellen der Rasenfläche ein Spektrum gemessen.

3.1.2.1 Aufbau und Funktionsweise des IRIS

Bei dem verwendeten Spektrometer handelt es sich um ein portables, batteriebetriebenes Gerät, welches im Modus *Dual Field Of View* betrieben werden kann, d.h. die Datennahme erfolgt für eine Target- und eine Referenzfläche gleichzeitig (vgl. Strahlengang in Abbildung 3.15). Auf eine Korrektur von möglichen Schwankungen in der Beleuchtung kann dadurch verzichtet werden (was evtl. der Fall wäre, wenn Target- und Referenzfläche nacheinander gemessen werden). Die Referenzfläche dient zur Erzeugung relativer Reflektanzen.

3.1.2.2 Berechnung der IRIS-Reflektanzspektren

Im folgenden werden die zur Berechnung der Reflektanzen aus Bodenmessungen notwendigen Größen bestimmt. Deren Beiträge zum Gesamtfehler werden angegeben, ebenso die Umrechnung der spektral hochaufgelösten Bodenmessungen in die spektrale Auflösung der DAEDALUS-Kanäle. Die graphische Darstellung erfolgt im wesentlichen anhand der Daten des Jahres 1997, eine Gegenüberstellung der gemessenen Spektren in den verschiedenen Jahre ist im Unterkapitel 3.1.2.7 zu finden.

Das Reflektanzspektrum einer Targetfläche ρ_T berechnet sich bei einer IRIS-Messung im Prinzip aus dem Vergleich der Messung einer Targetfläche M_T mit der Messung einer Referenzfläche M_R wohlbekannter Reflektanz ρ_R . Durch die Verwendung je eines Detektors für die Target- bzw. Referenzmessung kommt noch ein wellenlängenabhängiger Faktor (*Detektorfunktion* F_D) hinzu, welcher Unterschiede zwischen den beiden Detektoren kompensiert (näheres in Kap. 3.1.2.3)

$$\rho_T(\lambda) = \frac{M_T(\lambda)}{M_R(\lambda)} \cdot F_D(\lambda) \cdot \rho_R(\lambda) \quad [1]. \quad (3.3)$$

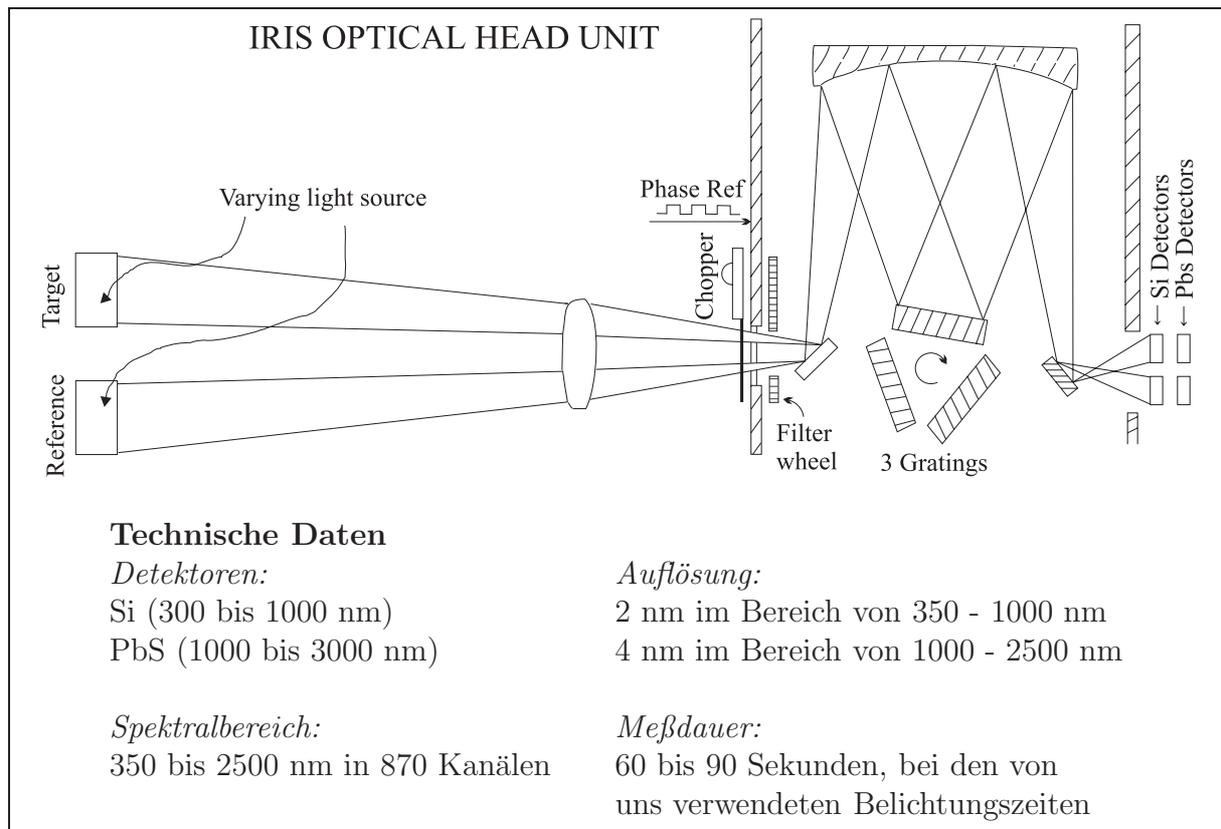


Abbildung 3.15: Schematischer Aufbau der Scannereinheit des Spektroradiometers IRIS [Geo] und technische Daten (Überblick). Das von Target- bzw. Referenzfläche gestreute Licht fällt über das System von Linse, Filter und Umlenkspiegeln auf eines von drei über eine Drehachse beweglichen Gittern, welches das einfallende Licht spektral zerlegt. Die so entstandenen Teilspektren (sowohl von der Target- als auch von der Referenzfläche) werden über weitere Umlenkspiegel auf für entsprechend der Wellenlänge empfindliche, thermoelektrisch gekühlte, Detektoren (Si oder PbS) abgebildet. Durch (automatisches) Ändern des Gitters im Strahlengang werden verschiedene Teilbereiche des Spektrums auf die Detektoren abgebildet, der Filter im Strahlengang sorgt für die Begrenzung des einfallenden Lichtes auf den für das Gitter bevorzugten Spektralbereich. Das System wählt automatisch den für den detektierten Spektralbereich richtigen Detektor. Es werden getrennte Detektoren zur Aufzeichnung von Target- und Referenzspektrum verwendet.

Die von der Bedienungssoftware des IRIS-Spektrometers gespeicherten Daten (Wellenlängen λ , Signale Targetkanal $M_T(\lambda)$ und Signale Referenzkanal $M_R(\lambda)$) sind bereits vorprozessiert. Von den Rohdaten (Spektren der Target- und Referenzfläche) wurde jeweils der Dunkelstrom abgezogen, sowie die bei der Aufzeichnung verwendeten Verstärkungsfaktoren herauskorrigiert¹¹. Zudem sind die aus der Verwendung von drei Gittern resultierenden drei Teilspektren (siehe Anmerkungen in Abb.3.15) von Target- bzw. Referenzkanal

¹¹Die Eichung des von uns verwendeten Spektrometers erfolgte im Juli 1997, knapp einen Monat vor der Überfliegung.

zu je einem Gesamtspektrum zusammengefaßt worden. Dabei wurden Überlappungen im Wellenlängenbereich zwischen den gemessenen Teilspektren sowie Unstetigkeiten zwischen den Teilspektren entfernt (zur Illustration siehe Abb. 3.16).

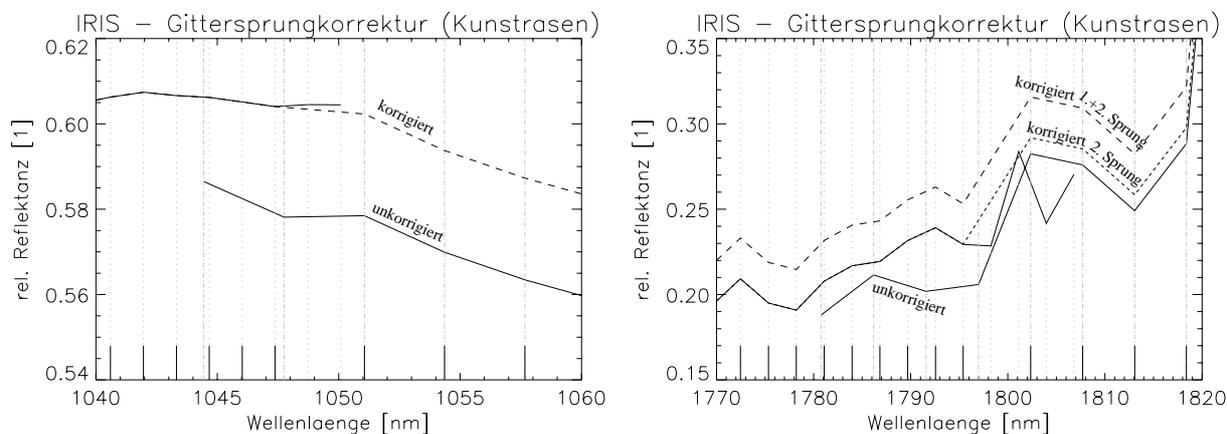


Abbildung 3.16: Illustration der Gittersprungkorrektur. Das mit den Si-Detektor gemessene 'Teilspektrum 1' (Spektralbereich 319-1047 nm) wird als repräsentativ angenommen. Das spektral an dieses anschließende 'Teilspektrum 2' wird durch Addition einer Konstanten korrigiert, so daß die Unstetigkeit verschwindet (lang gestrichelte Linie in der linken Teilabbildung). Ebenso wird mit dem dritten Meßbereich 'Teilspektrum 3' in Bezug zum 'Teilspektrum 2' verfahren [Kol96], siehe kurz gestrichelte Linie in der rechten Teilabbildung. Die zusätzliche Berücksichtigung der ersten Gittersprungkorrektur ergibt sich die endgültige Korrektur des 'Teilspektrums 3' (lang gestrichelte Linie).

Die Spektren sind bis auf einen Faktor in Strahldichten umgerechnet, das Referenzspektrum ist zusätzlich noch mit einer durch den Hersteller bestimmten Detektorfunktion multipliziert worden. Die folgende Abbildung 3.17 zeigt diesen Prozessierungsverlauf nochmals schematisch.

3.1.2.3 Detektorfunktion

Die Charakteristika der beiden Meßkanäle (Target- und Referenzkanal) des IRIS sind i.a. nicht gleich, sie werden deshalb durch eine Korrekturfunktion - die *Detektorfunktion* F_D - aneinander angepaßt. Die Detektorfunktion F_D ergibt sich aus dem Verhältnis der Messungen ein und derselben Referenzfläche (z.B. BaSO₄- oder Spectralon-Standard) mit beiden Detektoren

$$F_D(\lambda) = \frac{M_R(\text{Referenzfläche}, \lambda)}{M_T(\text{Referenzfläche}, \lambda)} \quad [1]. \quad (3.4)$$

Im Gegensatz zu der 1994 und 1995 verwendeten Bedienungssoftware wurden die Meßdaten 1997 bereits vorprozessiert (siehe Abb. 3.17). Dabei wird bereits eine vom Hersteller bestimmte Detektorfunktion F_D^{int} eingerechnet. Bei einer Messung derselben Referenzfläche mit beiden Detektoren (gleichzeitig als Target und Referenz) sollte bei

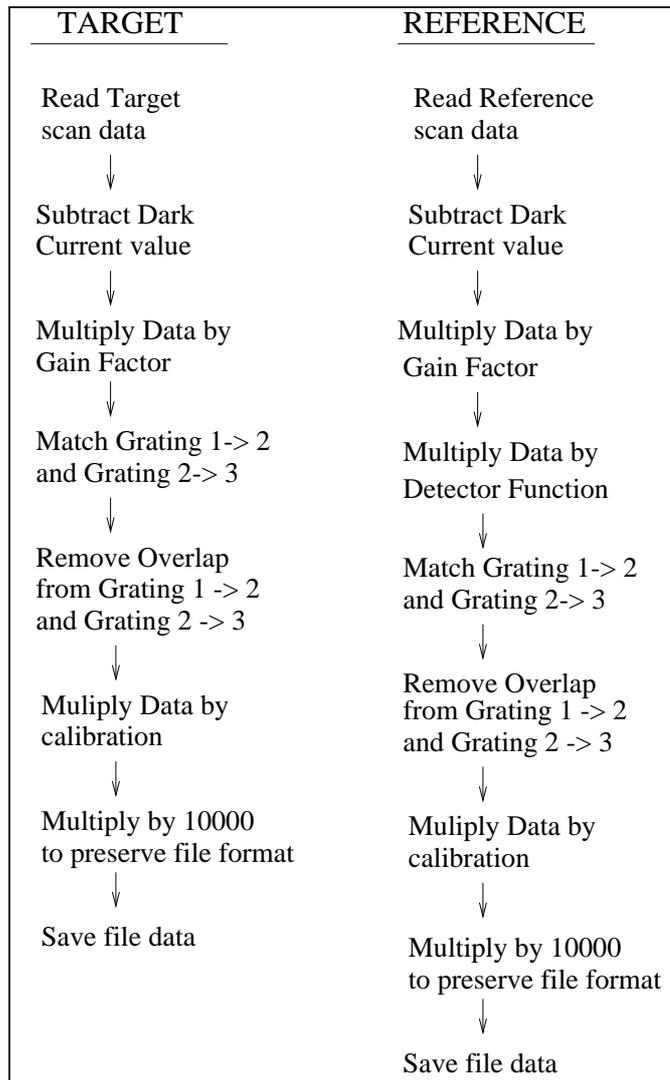


Abbildung 3.17: Prozessierungsverlauf bei der Aufzeichnung von Spektren mit dem IRIS MARK V, Software SIGNATURE V1.1 (in Anlehnung an [Geo]). Wird ein wohlbekannter Standard als Referenzfläche verwendet, so ist eine absolute Kalibrierung nicht notwendig. Die Bestimmung der Reflektanz ρ erfolgt dann durch Verwendung des Verhältnisses der gemessenen Strahldichten von Target- und Referenzfläche.

idealer Eichung der Quotient F_D^{int} für alle gemessenen Wellenlängenbereiche gleich eins sein. Abbildung 3.18 zeigt das Ergebnis für vier von uns über den Tag durchgeführte Kontrollmessungen. Zu erkennen ist, daß die einzelnen Quotienten von eins abweichen. Die Detektorfunktion F_D^{int} der Meßsoftware vermag die Unterschiede der beiden Meßkanäle in unseren Messungen nicht vollständig herauszukorrigieren. Weiterhin fällt der starke Unterschied im Verhältnis der Meßkanäle im Bereich ab 1900 nm auf. Dieser zeigt zum einen für alle Messungen einen Sprung im Übergang von kürzeren Wellenlängen kommend, zum anderen zeigt sich eine Abhängigkeit im Verhältnis der Meßkanäle von der Aufnahmezeit. Die beiden am Vormittag gewonnenen Messungen zeigen einen fast gleichen Verlauf, ebenso die beiden nach 12:00 Uhr MEZS¹² gewonnenen Messungen. Es ist jedoch ein deutlicher Unterschied im Verhältnis der Meßkanäle zwischen den Vormittags- und Nachmittagsmes-

¹²Mitteleuropäische Sommerzeit

sungen zu erkennen, was auf Veränderungen im Meßgerät aufgrund von Temperatur oder Transport deutet (systematischer Fehler). Weiterhin erkennt man noch Abweichungen an Stellen im Spektrum, an denen die Atmosphäre viel von der Sonnenstrahlung absorbiert (Absorptionsbande). An diesen Stellen mißt man sehr kleine Strahldichten mit einem großen relativen Rauschen, worauf die Ungenauigkeiten zurückzuführen sind.

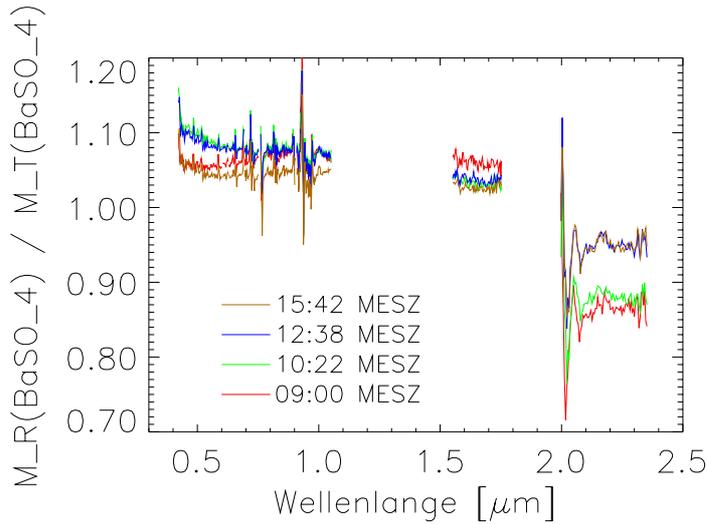


Abbildung 3.18: Verhältnis von Referenz- und Targetkanal des IRIS-Spektrometers zu verschiedenen Tageszeiten (Jahr 1997). Beide Kanäle maßen gleichzeitig das von einem BaSO₄-Standard reflektierte Licht. Zu erkennen ist, daß die einzelnen Quotienten von eins abweichen. Die bereits in der Auswertesoftware berücksichtigten Unterschiede zwischen den Kanälen werden nur unzureichend herauskorrigiert. Nicht dargestellt sind einige Wellenlängenbereiche, in denen Absorptionsbanden der Atmosphäre liegen (schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis).

Analog zu den Vorjahren wird daher auch für die Bestimmung der IRIS-Reflektanzspektren des Jahres 1997 eine Detektorfunktion F_D aus den Vergleichsmessungen $M_T(\text{BaSO}_4)/M_R(\text{BaSO}_4)$ bestimmt. Damit bei der Bestimmung der Reflektanzspektren der zeitlichen Änderung der Detektorfunktion F_D Rechnung getragen wird, wird für die 1997 durchgeführten Messungen die Detektorfunktion verwendet, die der jeweiligen Probenmessung zeitlich am nächsten liegt.

3.1.2.4 Kalibrierung mit Spectralon-Standard

Bei den Messungen mit dem IRIS-Spektrometer wurden in allen Jahren als Referenz BaSO₄-Standards verwendet. Aufgrund deren unbekannter absoluter Reflektanz ergeben sich nach Gl. 3.3 dann lediglich relative Reflektanzspektren. Um letztendlich zu absoluten Reflektanzspektren ρ_T^{abs} zu gelangen, wurde die absolute Reflektanz des im jeweiligen Jahr verwendeten BaSO₄-Standards $\rho_{\text{BaSO}_4}(\lambda)$ durch eine Vergleichsmessung (Interkalibration) mit einer uns wohlbekannten Spectralon-Referenz der Reflektanz $\rho_{\text{Sp}}(\lambda)$ bestimmt (ausführliche Angaben zum Spectralon finden sich in [Mei96]):

$$\rho_{\text{BaSO}_4}(\lambda) = \frac{M_T(\text{BaSO}_4, \lambda)}{M_R(\text{Spectralon}, \lambda)} \cdot \rho_{\text{Sp}}(\lambda) \cdot F_D \quad [1] \quad ; \text{für } 1994, 1995 \quad (3.5)$$

und

$$\rho_{\text{BaSO}_4}(\lambda) = \frac{M_T(\text{BaSO}_4, \lambda)}{M_T(\text{Spectralon}, \lambda)} \cdot \rho_{\text{Sp}}(\lambda) \quad [1] \quad ; \text{für 1997} . \quad (3.6)$$

Die Angabe von zwei Gleichungen ist nötig, da sich die Interkalibration zwischen den verschiedenen Jahren unterscheidet. 1994 und 1995 wurden BaSO₄ und Spectralon gleichzeitig gemessen (eines als Target und eines als Referenz), weshalb bei der Interkalibration die jeweilige Detektorfunktion berücksichtigt werden muß. 1997 wurden BaSO₄ und Spectralon kurz nacheinander mit derselben Detektoreinheit gemessen, die Detektorfunktion ist dadurch bei der Interkalibration nicht nötig. Ein 1997 parallel betriebenes Pyranometer zeigte keine Änderungen in der Beleuchtung während dieser Messungen.

3.1.2.5 Detektorrauschen

Eine Ursache für die Unsicherheit einer Messung ist das Detektor- bzw. Instrumentenrauschen σ_{Noise} , welches mit jeder Messung einhergeht. Das Instrumentenrauschen wurde für jeden IRIS-Kanal aus der Standardabweichung mehrerer BaSO₄-Messungen bestimmt, welche während der jeweiligen Kampagne (Jahre 1994, 1995, 1997) gewonnen wurden. Die BaSO₄-Messungen der Kampagne im Jahr 1997 zeigen allerdings einen großen systematischen Fehler (vgl. Abb. 3.18), weshalb das Detektorrauschen aus zwei kurz aufeinanderfolgend durchgeführten Messungen des Targets 'Flughafenvorfeld' bestimmt wurde. Tab. 3.2 gibt den relativen Anteil des Instrumentenrauschens beim IRIS Spektrometer während der verschiedenen Meßkampagnen.

Kampagne	Mittleres relatives Detektorrauschen [%]		
	Bd.1	Bd.2-8	Bd.9-10
Okt. 1994	0.49	0.62	1.73
Aug. 1995	1.13	1.03	0.84
Aug. 1997	0.69	0.35	1.27

Tabelle 3.2: Mittleres relatives Detektorrauschen eines Kanals des IRIS Spektrometers während der verschiedenen Meßkampagnen. Die Angaben beziehen sich auf das in der jeweiligen Kampagne gemessene Signal der Referenzfläche. Der Übersicht halber wurde über verschiedene, den Spektralbereiche des DAEDALUS entsprechenden, Wellenlängenintervalle gemittelt (gekennzeichnet durch z.B. 'Bd.2-8', d.h. die Mittelung erfolgte über die Wellenlängenbereiche des IRIS, welche von den Bändern 2 bis 8 abgedeckt werden). Dadurch ist zudem sichergestellt, daß Spektralbereiche sehr niedriger atmosphärischer Transmission in der Relativangabe nicht berücksichtigt werden und sich die Angabe nur auf von uns genutzte Wellenlängenbereiche bezieht.

3.1.2.6 Umrechnung für Vergleich mit DAEDALUS-Spektren

Die Wellenlängenauflösung des IRIS unterscheidet sich von der des DAEDALUS. Für einen Vergleich der Spektren müssen daher die IRIS-Spektren in die spektralen Empfindlich-

keiten¹³ des DAEDALUS durch Mittelwertbildung über die entsprechenden Wellenlängen umgerechnet werden. Bei einer Empfindlichkeit $r_{i,j}$ bei der Wellenlänge λ_i wurde die zentrale Wellenlänge $\bar{\lambda}_j$ im Kanal j ($j = 1 \dots 10$) durch

$$\bar{\lambda}_j = \frac{\sum_{i=1}^N r_{i,j} \cdot \lambda_i}{\sum_{i=1}^N r_{i,j}} \quad (3.7)$$

bestimmt, wobei N die Anzahl der Wellenlängenintervalle der für den Kanal j verwendeten Empfindlichkeitsfunktion \vec{r}_j angibt.

Die zur Empfindlichkeit des Kanals j des DAEDALUS korrespondierende Reflektanz $\rho_{\text{IRIS}}^{\text{Band } j}$ ergibt sich durch

$$\rho_{\text{IRIS}}^{\text{Band } j} = \frac{\sum_{i=1}^N r_{i,j} \cdot \rho_T(\lambda_i)}{\sum_{i=1}^N r_{i,j}}, \quad (3.8)$$

wobei $\rho_T(\lambda_i)$ die mit dem IRIS gemessene Reflektanz im Wellenlängenintervall i bezeichnet. Abbildung 3.19 zeigt exemplarisch ein aus einer IRIS-Messung bestimmtes Reflektanzspektrum des Flughafenvorfeldes, einschließlich der von extrem geringen Signal-zu-Rausch-Verhältnis gekennzeichneten Spektralbereiche (bedingt durch Absorptionsbanden in der Atmosphäre oder Gitterübergängen im IRIS-Spektrometer, siehe auch Anmerkungen in Kap. 3.1.2.3). Desweiteren sind die Verläufe der spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der DAEDALUS-Bänder 1 bis 10 im Jahre 1997 gezeigt. Der Abbildung ist zu entnehmen, daß die bei der IRIS-Messung nicht verwertbaren Spektralbereiche außerhalb der Sensitivität des DAEDALUS liegen. Mit 'nicht verwertbar' sind vor allem die Bereiche bei Wellenlängen um grob 1400 nm (dort finden sich z.B. Absorptionsbanden von Wasserdampf bei 1379 nm, 1389 nm und 1455 nm [TD93]) bzw. 1800 nm (u.a. Gitterübergang im IRIS sowie Absorptionsbande von Wasserdampf) gemeint.

Die Bestimmung des zugehörigen Fehlers ergibt sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz. Dabei ist zu beachten, daß eine Korrelation zwischen benachbarten Kanälen des IRIS-Spektroradiometers besteht (die Reflektanz zwischen zwei benachbarten Wellenlängenintervallen ist ähnlich). Dadurch tragen nicht nur die Unsicherheiten eines einzelnen Meßkanals zum resultierenden Fehler bei, sondern es muß auch die Kovarianzmatrix C_I der Signale in den einzelnen IRIS-Kanälen berücksichtigt werden:

¹³Für jeden DAEDALUS-Kanal j wurde die spektrale Empfindlichkeit \vec{r}_j über einen weiten Wellenlängenbereich durch die DLR bestimmt (z.B. für jeden der Kanäle 1 – 8 über den Wellenlängenbereich von 400 - 1100 nm in Wellenlängenintervallen von $\Delta\lambda = 1$ nm) und kann für die einzelnen IRIS-Kanäle angegeben werden. Die Empfindlichkeitsfunktionen \vec{r}_j der verschiedenen DAEDALUS-Kanäle j verschiedener Jahre zeigt Abbildung A.2 im Anhang.

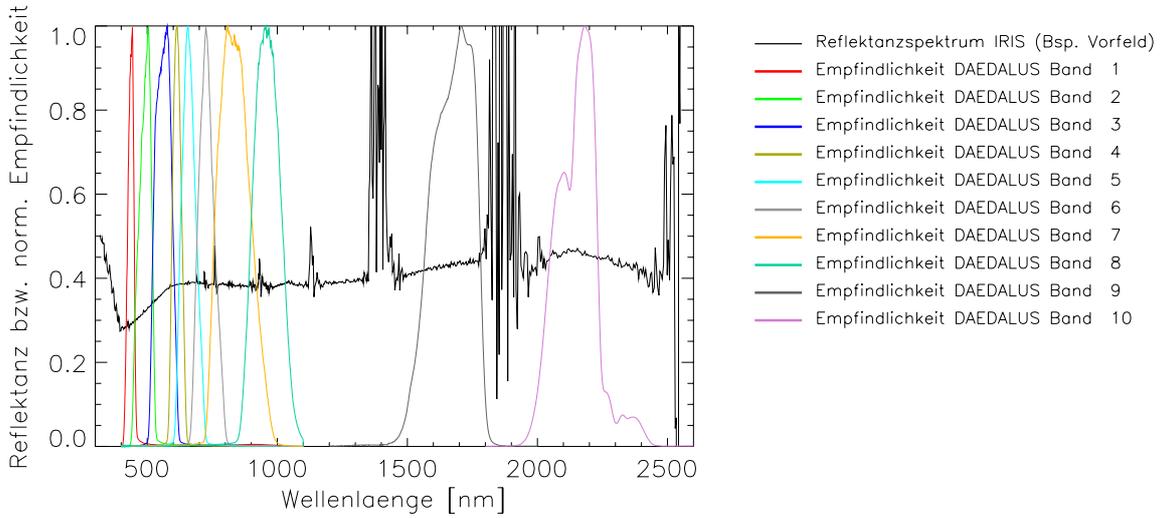


Abbildung 3.19: Illustration zur Umrechnung der IRIS-Reflektanzspektren in die spektrale Auflösung des DAEDALUS Sensors. Die Abbildung zeigt ein aus einer IRIS-Messung bestimmtes Reflektanzspektrum des Flughafenvorfeldes, einschließlich der von extrem geringem Signal-Rausch-Verhältnis gekennzeichneten Spektralbereiche (aufgrund von Absorptionsbanden oder Gitterübergängen im IRIS-Spektrometer). Desweiteren sind die Verläufe der spektralen Empfindlichkeitsfunktionen von verschiedenen DAEDALUS-Bändern dargestellt.

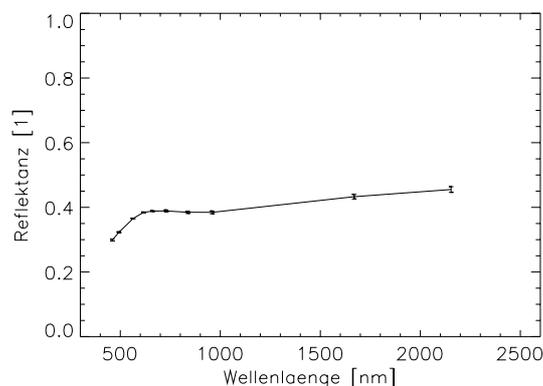
$$\sigma_{\rho_{\text{IRIS}}^{\text{Band } j}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{r_{i,j}}{\sum_{i=1}^N r_{i,j}} \cdot \left[C_I \times \frac{\vec{r}_j}{\sum_{i=1}^N r_{i,j}} \right]_i \right)} \quad (3.9)$$

Aus der Umrechnung nach Gl. 3.8 und Gl. 3.9 ergibt sich das in Abb. 3.20 gezeigte 'IRIS'-Spektrum in der spektralen Auflösung des DAEDALUS.

Tabelle 3.3 gibt die resultierende Genauigkeit der Bodenmessung für die verschiedenen Targets (Fehler einer Einzelmessung). Der Übersichtlichkeit halber wurden diese über drei Intervalle der DAEDALUS-Bänder gemittelt (Band 1, Bänder 2-8 und Bänder 9-10). Man erkennt eine große Variabilität der Ungenauigkeit zwischen den verschiedenen Targets. Diese ist darauf zurückzuführen, daß das Detektorrauschen als additiv angenommen wird und der relative Fehler somit von der Signalhöhe (der Reflektanz des Targets) selbst abhängt. Targets mit niedriger Reflektanz zeigen einen größeren relativen Fehler.

Im Allgemeinen wurden M IRIS-Messungen $\rho_{\text{IRIS},m}$, $m = 1 \dots M$ an verschiedenen Stellen der Zielfläche durchgeführt. Der räumliche Abstand zwischen den Messungen betrug ca. 0,4m, die insgesamt abgedeckte Fläche entspricht etwa der halben Fläche eines DAEDALUS-Pixels. Die einzelnen IRIS-Messungen wurden zu einer repräsentativen mittleren Bodenreflektanz $\overline{\rho_{\text{IRIS}}}$ mit Fehler $\sigma_{\overline{\rho_{\text{IRIS}}}}$ zusammengefaßt:

Abbildung 3.20: Beispiel für ein in die spektrale Auflösung des DAEDALUS Sensors umgerechnetes IRIS-Reflektanzspektrum. Dieses folgt aus der Umrechnung des in Abb. 3.19 gezeigten Spektrums des Flughafenvorfeldes nach den Gleichungen 3.8 und 3.9.



Target	Mittlere relative Genauigkeit der IRIS-Reflektanzen [%]								
	1994			1995			1997		
BaSO ₄ -Standard	0.43	0.55	1.5	1.0	0.96	0.90	0.74	0.57	1.4
Flughafenvorfeld	1.0	1.1	2.8	2.9	2.4	1.6	0.92	0.65	1.8
Asphalt Flughafen	3.2	3.6	7.6	8.2	7.1	4.0	1.6	0.95	3.1
Tennisplatz	6.4	3.8	3.3	12.0	5.2	1.3	-	-	-
Kunstrasen	6.6	5.7	6.0	16.4	11.6	8.7	2.0	1.0	2.0
Asphalt Gewerbegeb.	3.3	4.0	11.4	8.6	7.7	4.6	1.8	1.0	3.8
Naturrasen	6.1	5.7	8.5	14.8	10.0	3.6	2.7	1.2	2.7

Tabelle 3.3: Relative Genauigkeit der IRIS-Reflektanzen (Einzelmessung), gemittelt über drei Intervalle der DAEDALUS-Bänder (Band 1, Bänder 2-8 und Bänder 9-10).

$$\overline{\rho_{\text{IRIS}}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \rho_{\text{IRIS},m} \quad , \text{für jeden Kanal } j \quad (3.10)$$

$$\sigma_{\overline{\rho_{\text{IRIS}}}} = \frac{1}{M} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sigma_{\rho_{\text{IRIS},m}}^2} \quad , \text{für jeden Kanal } j \quad . \quad (3.11)$$

Abbildung 3.21 zeigt exemplarisch die in die spektrale Auflösung des DAEDALUS umgerechneten IRIS-Einzelmessungen einer Asphaltfläche und das sich nach Gl. 3.10 aus diesen ergebene mittlere Bodenreflektanzspektrum.

3.1.2.7 Vergleich der Bodenmessungen der Jahre 1994, 1995 und 1997

Die Bodenmessungen wurden in den verschiedenen Jahren an den gleichen Orten (Meßpunkte 1 bis 6, vgl. Abb. 3.8) durchgeführt. Aus dem Vergleich dieser Messungen lassen sich Abschätzungen über die zeitliche Entwicklung einer Fläche gewinnen (und damit über

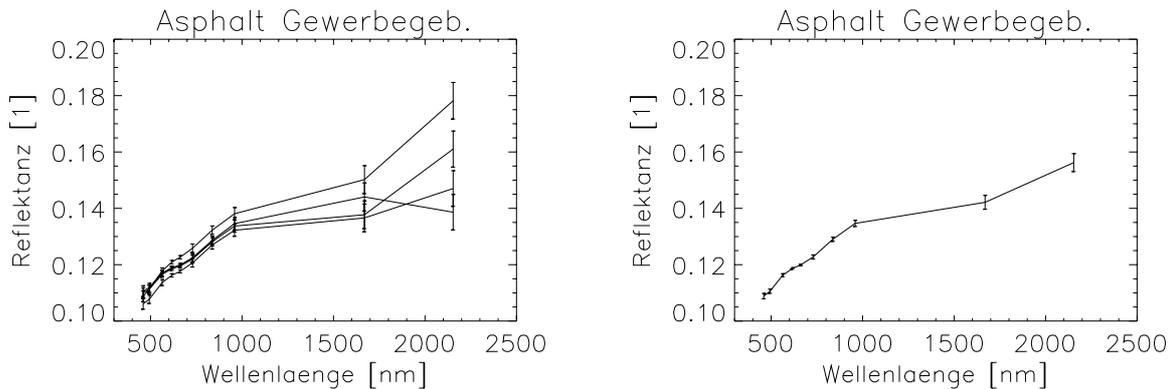


Abbildung 3.21: Beispiel zur Bestimmung der mittleren IRIS-Reflektanz. Die linke Abbildung zeigt die in die spektrale Auflösung des DAEDALUS umgerechneten IRIS-Einzelmessungen der Asphaltfläche im Gewerbegebiet (Meßort 5, 1997). Das sich nach Gl. 3.10 aus diesen ergebene mittlere Bodenreflektanzspektrum $\bar{\rho}_{\text{IRIS}}$ ist in der rechten Abbildung dargestellt.

die längerfristige Eignung als gleichbleibende Referenz). Abb. 3.22 zeigt die gemessenen mittleren Spektren der einzelnen Meßpunkte.

Es ist zu erkennen, daß je nach Oberflächentyp verschieden starke Variationen der gemessenen Reflektanzspektren auftreten. So zeigen sich stärkere Unterschiede in den Spektren des Kunstrasens sowie des Flughafenvorfeldes; für die beiden Asphaltflächen läßt sich 1997 eine Erhöhung der Reflektanz gegenüber den Vorjahren feststellen. Die Unterschiede in den Spektren des Vorfeldes sind zum einen auf Baumaßnahmen und zum anderen auf Alterungsprozesse des Materials zurückzuführen. Der Teil der Fläche, an welchem gemessen wurde, wurde erst 1994 erbaut. Der Unterschied in der Reflektanz beträgt etwa 0,06 (bzw. 16,8 % vom mittleren Spektrum) zwischen den Spektren von 1994 und 1995. Er ist auf einen Alterungsprozeß des Materials zurückzuführen. Die im Gegensatz zu 1995 erhöhte Reflektanz im Jahr '97 ist auf eine Erneuerung des Vorfeldes im Jahr 1997 zurückzuführen. Inwieweit dabei das gleiche Material verwendet wurde läßt sich nicht reproduzieren. Gehen wir davon aus, daß dem nicht so ist, so kann zumindest eine Ähnlichkeit der Reflektanzen von für Flughafenvorfelder verwendeten Materialien abgeschätzt werden. Die mittleren relativen Unterschiede betragen im Bezug auf das 1997'er Spektrum etwa 9 %. Die Unterschiede in den Reflektanzspektren der Asphaltflächen sind zwischen den Jahren 1994/95 im Rahmen der Meßgenauigkeit. Signifikante Unterschiede stellen sich erst im Vergleich zu den '97er Messungen ein. Beide Asphaltflächen zeigen 1997 eine Erhöhung im Reflektanzspektrum von $\Delta\bar{\rho} \approx 0.027$ (Asphalt Flughafen) bzw. $\Delta\bar{\rho} \approx 0.017$ (Asphalt Gewerbegebiet), was einem relativen Anstieg von etwa 18 % gleichkommt. Im Gegensatz zu dem Flughafenvorfeld sind bei einem Zeitunterschied von 10 Monaten für die Asphaltflächen keine starken Änderungen des Reflektanzspektrums¹⁴ festzustellen. Beim

¹⁴Nach unserer Erfahrung gibt es große Unterschiede in der Reflektanz verschiedener Asphaltflächen, siehe Anhang A.3.

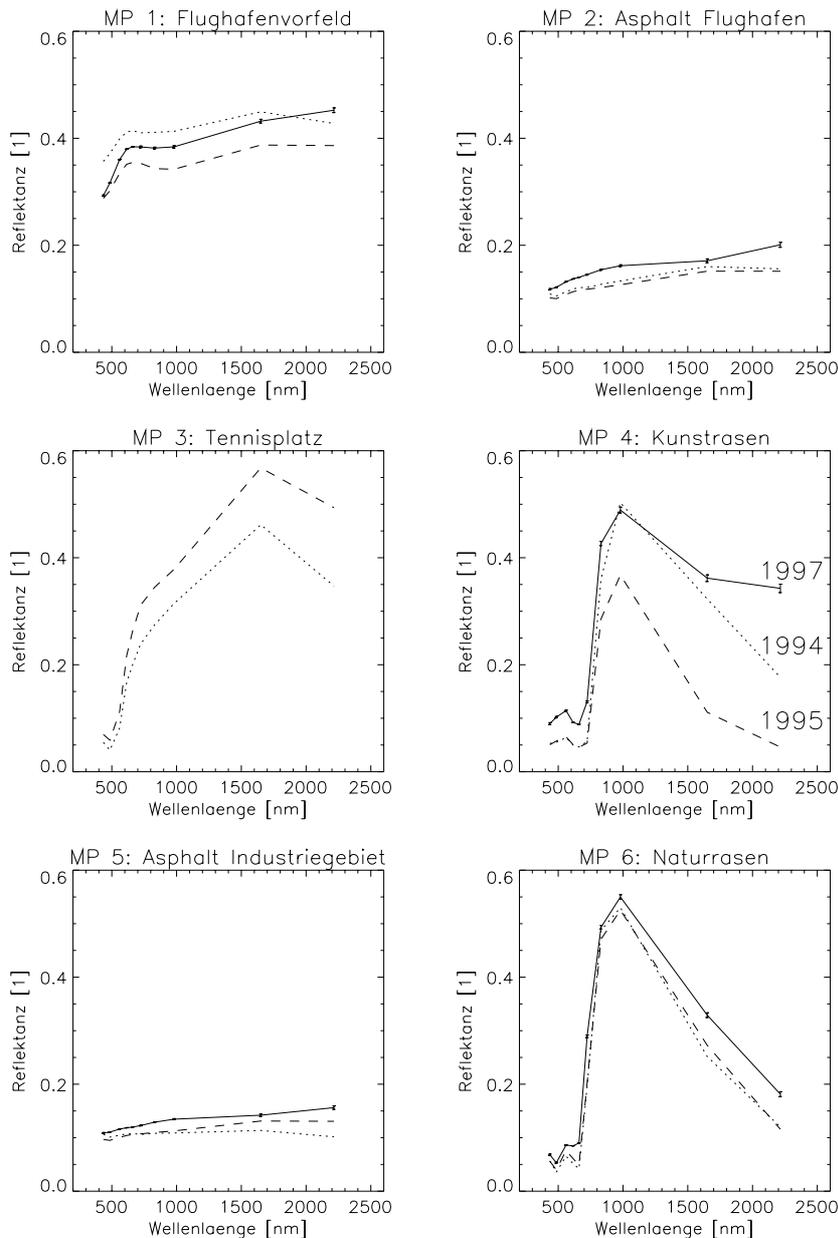


Abbildung 3.22: Spektren der IRIS-Bodenmessungen in den verschiedenen Jahren, umgerechnet in die spektrale Auflösung des DAEDALUS-Scanners. Der Übersicht halber sind die den zehn DAEDALUS-Kanälen entsprechenden Reflektanzwerte durch Liniensegmente verbunden und lediglich für das Jahr 1997 die Meßunsicherheiten durch Fehlerbalken gekennzeichnet (ähnliche Größenordnung in den anderen Jahren). Die gepunktete Linie kennzeichnet die Spektren im Jahr 1994, die gestrichelte Linie die von 1995 und die durchgezogene Linie die im Jahr 1997. Für den Meßpunkt 3 'Tennisplatz' liegt im Jahr 1997 keine Messung vor.

Vergleich der Spektren mit Zeitabständen von zwei bis drei Jahren zeigt sich eine zunehmende Aufhellung. Eine qualitative Aufhellung des Asphalts mit zunehmendem Alter wurde auch bei einem Vergleich zwischen den Jahren '91, 92 und '94 gefunden [Kol96]. Der Tennisplatz zeigt mit zunehmender Wellenlänge größer werdende Abweichungen (für diesen wäre eine Aufhellung wegen starker Trockenheit denkbar), ähnliches ist auch für die Naturrasenfläche festzustellen (zwischen den Jahren '94/95 und '97). Entgegen der Erwartung größerer Unterschiede in den Spektren des Naturrasens [Kol96], zeigen die mittleren Spektren im Rahmen der Meßfehler eine gute Übereinstimmung. Die genaue Ursache bleibt unklar, denkbar wäre die regelmäßige Pflege des Fußballplatzes durch den

Platzwart.

3.1.3 Vergleich der Spektren von IRIS und DAEDALUS

Die Umrechnung der IRIS-Reflektanzspektren in die spektrale Auflösung des DAEDALUS nach Kap. 3.1.2.6 ermöglicht den Vergleich der gemessenen Reflektanzspektren. Hierzu wurden zunächst sämtliche Ausschnitte in den verschiedenen Flugstreifen bestimmt, in welchen die Bodenmeßpunkte (vgl. Abb. 3.8) aufgenommen wurden. Von diesen wurde für jede Befliegung jeweils derjenige gewählt, in welchem der Beobachtungswinkel des DAEDALUS der Nadir-Richtung¹⁵ am nächsten lag. Dadurch werden mögliche Unterschiede der Spektren aufgrund zu unterschiedlicher Beleuchtungsgeometrie (BRDF-Effekt) zwischen IRIS und DAEDALUS minimiert. Die noch zu erwartenden Unterschiede für die der Beleuchtungsgeometrie des IRIS jeweils am nächsten kommenden DAEDALUS-Messungen werden in Kap. 3.1.3.1 näher bestimmt.

Jeder Bodenmeßpunkt kann mit einer Genauigkeit von etwa einem Pixel in den Luftbildern wiedergefunden werden. Dadurch können mögliche Bodeninhomogenitäten zu Unterschieden zwischen den Bodenmessungen und den DAEDALUS-Spektren führen. Aus diesem Grunde wurde das DAEDALUS-Spektrum eines Meßpunktes aus dem Mittelwert einer 5×5 - Umgebung bestimmt. Die zugehörigen Standardabweichungen werden als Maß für die Bodeninhomogenität interpretiert.

3.1.3.1 Unsicherheiten aufgrund unterschiedlicher Beobachtungswinkel (BRDF-Effekte)

Eine weitere Ursache für Abweichungen zwischen den aus den DAEDALUS- und den IRIS-Messungen bestimmten Reflektanzen können BRDF-Effekte darstellen, d.h. Unterschiede in den gemessenen Reflektanzen aufgrund von unterschiedlichen Beleuchtungs- und Beobachtungswinkeln. Diese sind zum einen durch zeitliche Unterschiede zwischen den Messungen bedingt (Änderung der Beleuchtungswinkel), zum anderen durch Off-Nadir-Beobachtung der Bodenfläche mit dem DAEDALUS-Sensor (siehe Tab. 3.4).

Die spektrale Reflexionsfunktion BRDF einiger künstlicher Oberflächen (z.B. Beton oder auch einige Dachbedeckungen) kann durch ein empirisches Modell beschrieben werden [MWBS96]. Unter Verwendung der Parameter für Beton ([MWBS96]) und Asphalt ([Mon98]) kann der Reflektanzunterschied zwischen der IRIS Bodenmessung und der DAEDALUS-Messung abgeschätzt werden.

Tabelle 3.4 zeigt die aufgrund von BRDF-Effekten erwarteten Unterschiede der drei zur Rekalibration verwendeten Bodenflächen für die verschiedenen Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel (Sonnenzenitwinkel θ_i , Beobachtungszenitwinkel θ_r und Relativazimutwinkel ν). $f_r^{\theta_r=0^\circ}$ gibt den BRDF-Wert bei Beobachtung aus Nadir (Geometrie der IRIS-Messungen) an, f_r gibt den BRDF-Wert für den entsprechenden Aufnahmewinkel der DAEDALUS-Messung. Die relativen Unterschiede liegen unterhalb 2 % für Beobachtungswinkel kleiner 10° . Unter ausgewählten Beleuchtungsgeometrien (extreme Off-Nadir

¹⁵Das IRIS-Spektrometer blickt aus Nadirrichtung auf den Boden.

Bodenfläche	Befliegung Zeit UT, Flughöhe	θ_i Grad	θ_r Grad	ν Grad	$f_r^{\theta_r=0^\circ}$ 10^{-2} sr^{-1}	f_r 10^{-2} sr^{-1}	Δ %
1	07:27, 300 m	61.4	3.9	98.8	6.53	6.52	-0.11
2	07:27, 300 m	61.4	2.6	81.2	2.76	2.77	0.41
5	07:11, 300 m	63.9	15.8	84.7	2.54	2.71	7.00
1	10:23, 900 m	40.8	36.3	149.1	6.80	6.94	2.10
2	10:23, 900 m	40.8	33.4	149.1	4.23	3.65	-13.87
5	10:33, 900 m	40.3	16.5	27.6	4.26	4.41	3.44
1	11:36, 300 m	39.4	7.6	177.1	6.51	6.45	- 0.84
2	11:36, 300 m	39.4	1.9	2.9	4.31	4.34	0.55
5	11:12, 300 m	39.2	7.2	12.3	4.32	4.40	1.88

Tabelle 3.4: Erwartete Reflektanzunterschiede aufgrund von BRDF-Effekten für verschiedene Bodenflächen bei verschiedenen Beobachtungs- und Beleuchtungswinkeln. Die drei Zeilen kennzeichnen die drei verschiedenen Befliegungen der Kampagne im Jahr 1997. Δ bezeichnet die erwartete relative Abweichung der BRDF-Werte (diese ist gleich der relativen Abweichung der Reflektanzwerte).

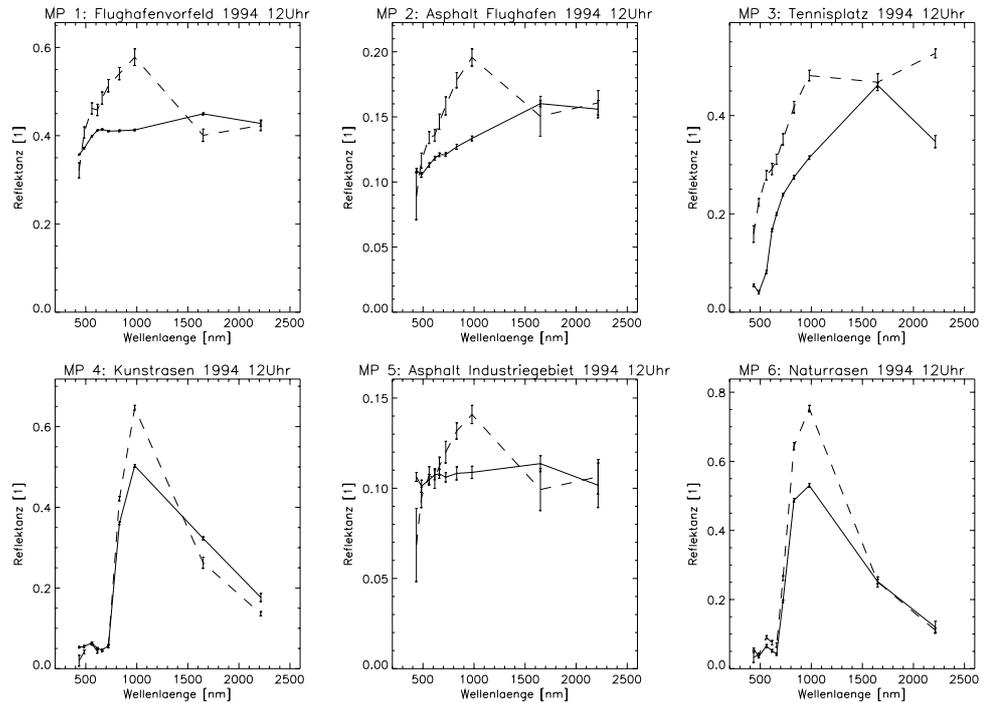
Beobachtung und in Richtung der Vorwärtsstreuung) sind relative Abweichungen bis zu 14 % möglich. Insgesamt liegen die abgeschätzten Unterschiede aufgrund der verschiedenen Beobachtungsgeometrien zwischen IRIS und DAEDALUS für die von uns verwendeten Messungen im Rahmen der Genauigkeit der verwendeten Modellfunktion. Auf eine Berücksichtigung des Effektes wurde daher verzichtet.

Die Abbildungen 3.23 bis 3.25 zeigen den Vergleich zwischen den IRIS- und den DAEDALUS-Reflektanzen in den Jahren 1994, 1995 und 1997. Es zeigen sich in den verschiedenen Jahren unterschiedliche Übereinstimmungen zwischen den Spektren des DAEDALUS und den IRIS-Bodenmessungen. Bei einem Vergleich der Spektren innerhalb eines einzelnen Jahres lassen sich systematische Unterschiede im Verlauf der Spektren feststellen. Diese fallen in den verschiedenen Befliegungen unterschiedlich aus.

Im Jahr 1994 weisen die Spektren bei kleinen sowie bei großen Wellenlängen eine akzeptable Übereinstimmung auf. Für die Spektralkanäle 3 bis 8 (Wellenlängen zwischen 0,5–1.05 μm) liegen die mit Hilfe des Atmosphärenmodells bestimmten Reflektanzwerte (die DAEDALUS-Reflektanzen) signifikant höher als die Reflektanzwerte der Bodenmessungen. Bezogen auf die Bodenmessungen sind relative Abweichungen zwischen 13 % bis max. 43 % feststellbar (25 % im Mittel).

Im Gegensatz dazu zeigen die Messungen von 1995 die relativ beste Übereinstimmung zwischen den Messungen in den Spektralkanälen 1–8 des DAEDALUS-Sensors mit mittleren relativen Unterschieden von 7 %. Signifikante Unterschiede zeigen sich bei Wellenlängen oberhalb von 1500 nm. Die DAEDALUS-Spektren liegen hier bei vier der sechs Flächen unterhalb der mit dem IRIS bestimmten Spektren, teilweise bis zu relativ 30 % (25 % im Mittel). Im Kanal 7 (Wellenlängenbereich von etwa 760 - 900 nm) liegen die DAEDALUS-Spektren im Vergleich zu den IRIS-Spektren tendenziell zu hoch.

1994



1995

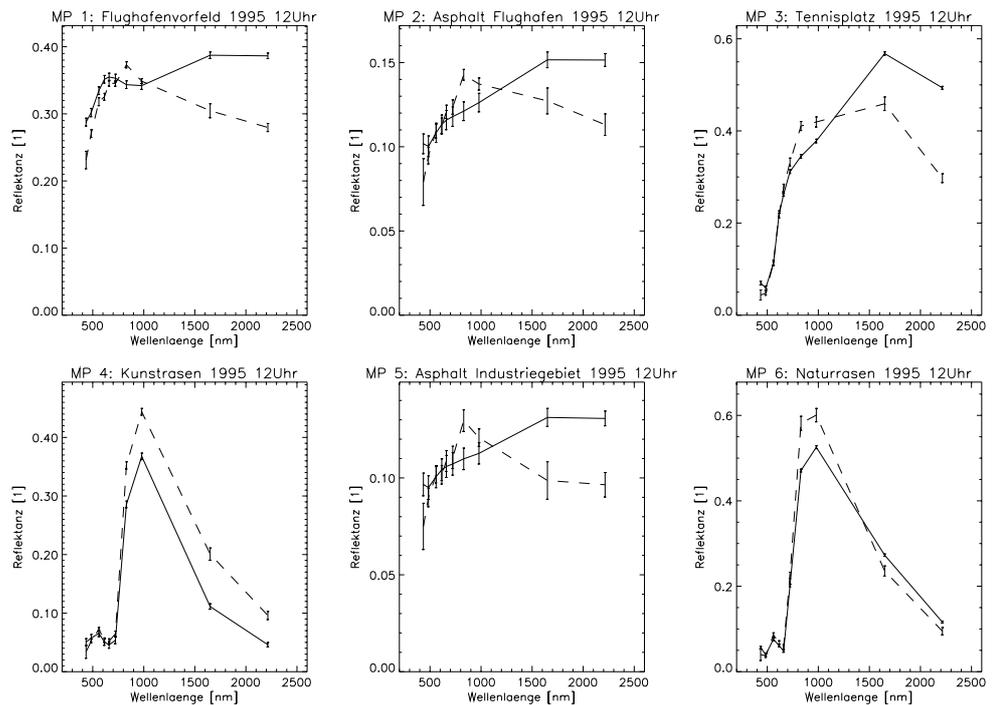
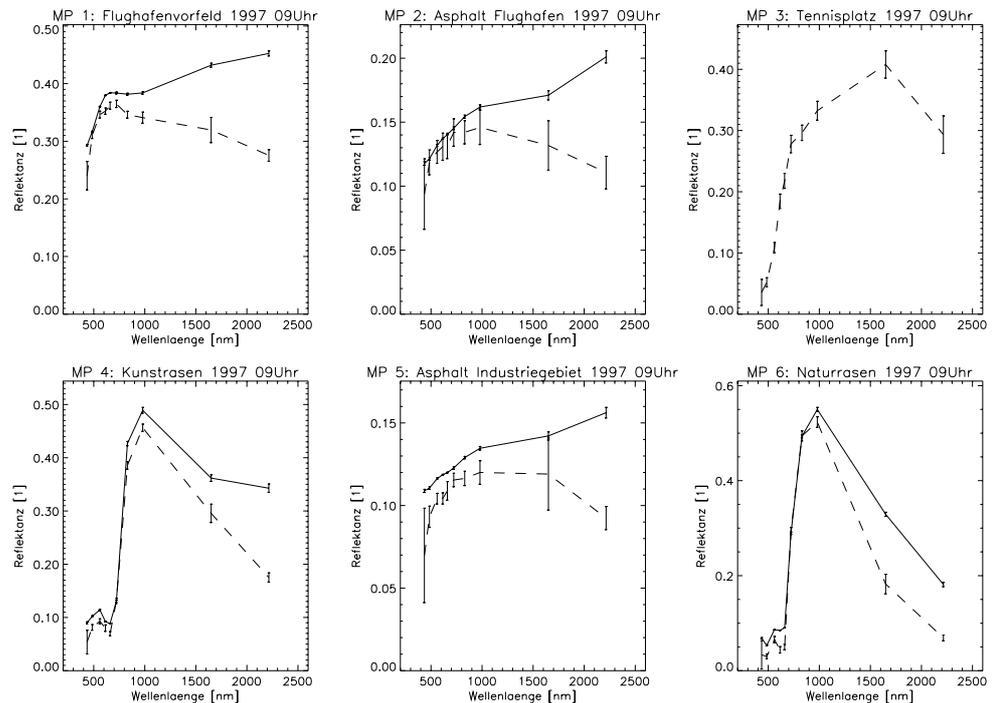


Abbildung 3.23: Vergleich der gemessenen IRIS- und DAEDALUS-Reflektanzspektren in den Jahren 1994 (obere sechs Plots) und 1995 (untere sechs Plots). Der Übersicht halber sind die den zehn DAEDALUS-Kanälen entsprechenden Reflektanzwerte durch Liniensegmente verbunden. Die gestrichelten Linien kennzeichnen die DAEDALUS-Spektren und die durchgezogenen Linien die IRIS-Spektren.

1997

7:30 Uhr (UT)



1997

11:30 Uhr (UT)

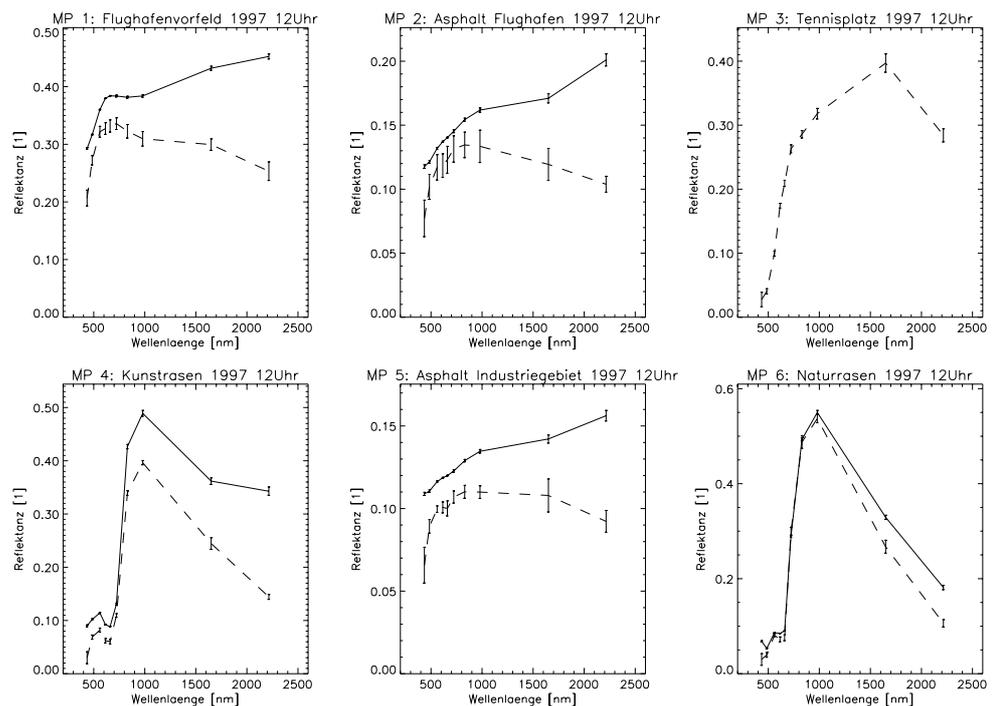


Abbildung 3.24: Vergleich der gemessenen IRIS- und DAEDALUS-Reflektanzspektren im Jahr 1997, Flughöhe 300 m. Die oberen sechs Messungen entstammen der Befliegung gegen 07.30 UT, die unteren sechs Messungen der Befliegung gegen 11.30 Uhr UT. Der Übersicht halber sind die den zehn DAEDALUS-Kanälen entsprechenden Reflektanzwerte durch Liniensegmente verbunden. Die gestrichelten Linien kennzeichnen die DAEDALUS-Spektren und die durchgezogenen Linien die IRIS-Spektren. Für den Meßpunkt 3 'Tennisplatz' liegt im Jahr 1997 keine IRIS-Messung vor.

1997

10:30 Uhr (UT)

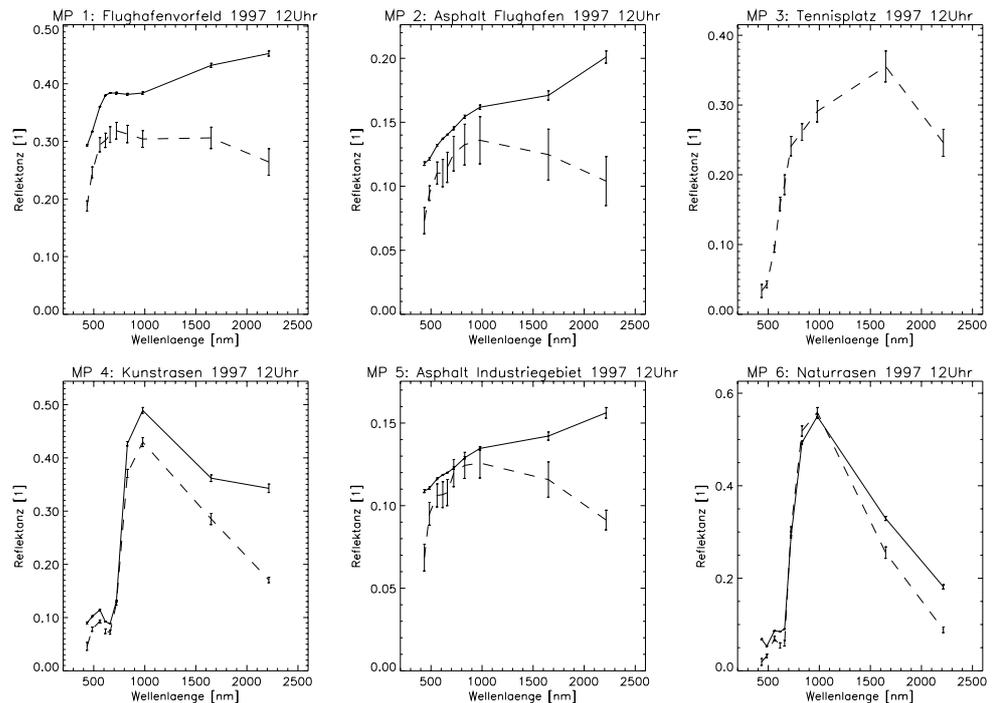


Abbildung 3.25: Vergleich von IRIS- und DAEDALUS-Spektren im Jahr 1997, Flughöhe 900 m, 10.30 Uhr UT. Der Übersicht halber sind die den zehn DAEDALUS-Kanälen entsprechenden Reflektanzwerte durch Liniensegmente verbunden. Die gestrichelten Linien kennzeichnen die DAEDALUS-Spektren und die durchgezogenen Linien die IRIS-Spektren. Für den Meßpunkt 3 'Tennisplatz' liegt im Jahr 1997 keine IRIS-Messung vor.

Der Vergleich der Spektren der Befliegung 1997 (Abb. 3.24 und 3.25) zeigt ein ähnliches Ergebnis wie der Vergleich für das Jahr 1995, wobei die DAEDALUS-Reflektanzen für alle Kanäle unterhalb der Reflektanzspektren der Bodenmessungen liegen. Insbesondere in den hohen Kanälen des DAEDALUS (ab dem 'Nahen Infrarot') sind die mit dem Atmosphärenmodell bestimmten Spektren systematisch unterhalb der Spektren der Bodenmessungen. Zudem zeigt sich zusätzlich ein Unterschied bei der Betrachtung des Vergleichs zwischen der morgens durchgeführten Befliegung (obere sechs Plots in Abb. 3.24) und der Befliegung vom Mittag (untere sechs Plots in Abb. 3.24). Bei der morgens durchgeführten Befliegung betragen die relativen Unterschiede im Mittel knapp 9 % für die Kanäle 1–8 und 34 % für die Kanäle 9–10. Diese vergrößern sich bei der mittags durchgeführten Befliegung auf 18 % für die Kanäle 1–8 und 39 % für die Kanäle 9–10. Der größere Unterschied zur Mittagszeit zwischen den DAEDALUS- und den IRIS-Reflektanzspektren ist insbesondere an den künstlichen Flächen (Vorfeld und Asphalt) zu erkennen. Ähnliche Unterschiede zwischen den Spektren finden sich auch bei Vergleich der Bodenmessungen mit den Daten der 900 m Befliegung (Abb. 3.25).

Davon ausgehend, daß sich die Detektoreigenschaften des DAEDALUS nicht zwischen den beiden Befliegungen geändert haben, müssen die verschiedenen Abweichungen als Indiz für eine zu beiden Zeitpunkten nicht ausreichende Atmosphärenbeschreibung ange-

sehen werden. D.h. die von uns verwendeten Daten der Radiosondenaufstiege der etwa 60 km entfernten Wetterstation vermögen die am Meßort vorliegenden Atmosphärenbedingungen nur unzureichend und für die verschiedenen Tageszeiten auch verschieden gut wiederzugeben. Die Unsicherheiten in diesen Parametern gehen direkt ein in die über das Modell bestimmten Reflektanzwerte. Zum anderen werden ebenfalls die bei der im Labor durchgeführten absoluten Strahldichteichung entstandenen Unsicherheiten und systematischen Fehler an diese Reflektanzen weitergereicht (siehe auch Anmerkungen in Kap. 3.1.1.3).

Eine weitere Ursache für unterschiedliche Abweichungen kann sein, daß sich die Bodenflächen zwischen den beiden Befliegungszeiten (morgens / mittags) in ähnlicher Weise verändert haben. Für natürliche Flächen (und auch für den Kunstrasen, siehe Anmerkungen in Kap. 3.1.2) wäre eine Veränderung der Fläche, z.B. eine austrocknende Rasenfläche, noch denkbar, allerdings erwarten wir insbesondere für die künstlichen Oberflächen kein derartiges Verhalten. Diese Erwartung wird durch die parallel zu den Befliegungen durchgeführten Bodenmessungen gestützt, welche keine starke Veränderung der gemessenen Reflektanzspektren aufzeigen. Die relative Standardabweichung der Bodenmessungen beträgt für die Beton- und Asphaltflächen weniger als 2,8 % (1,8 % im Mittel) für Wellenlängen entsprechend den DAEDALUS-Bändern 1–8. Bei größeren Wellenlängen beträgt die relative Standardabweichung der Bodenmessungen 6,3 % im Mittel (maximal 7,8 %).

3.1.4 Umrechnung der DAEDALUS-Reflektanzen auf die IRIS-Bodenmessungen

Aufgrund der Betrachtungen in den vorherigen Kapiteln gehen wir davon aus, daß sich die absoluten Reflektanzspektren durch die IRIS-Messungen besser bestimmen lassen als durch die des DAEDALUS. Es wurden daher in Anlehnung an [Kol96] für jedes Spektralband j des DAEDALUS die Koeffizienten a_j, b_j einer linearen Korrekturfunktion bestimmt, mit denen sich die durch die Atmosphärenkorrektur bestimmten DAEDALUS-Spektren $\rho_D(j)$ auf die Spektren der IRIS-Messung (vgl. Gl. 3.10) transformieren lassen.

3.1.4.1 Umrechnung durch lineare Transformation

Bezeichnet man die DAEDALUS-Reflektanzen eines Meßortes k im Band j mit $x_{k,j}$ und die zugehörige Unsicherheit mit $\sigma_{x_{k,j}}$ und analog die IRIS-Messungen mit $y_{k,j}$ und Meßfehler $\sigma_{y_{k,j}}$, so minimierten wir zur Bestimmung der Transformationskoeffizienten a_j, b_j die Summe der Quadrate des Abstandes der Fehlerellipsen von der Geraden [BL98]:

$$S = \sum_{k=1}^N \frac{[y_{k,j} - (b_j + a_j x_{k,j})]^2}{\sigma_{y_{k,j}}^2 + a_j^2 \sigma_{x_{j,k}}^2} \quad N : \text{Anzahl der verwendeten Bodenspektren} \quad (3.12)$$

für jedes Band j . Die transformierten DAEDALUS-Spektren $\rho_{D,tr}$ sind dann gegeben durch

$$\rho_{D,tr,j} = a_j \cdot \rho_{D,j} + b_j \quad j = 1 \text{ bis } 10 \text{ für die DAEDALUS - Bänder.} \quad (3.13)$$

Tabelle 3.5 zeigt die nach Gl. 3.12 ermittelten Transformationskoeffizienten, wobei die Bodenspektren der Asphaltflächen sowie des Flughafenvorfeldes als Eingangsgrößen Verwendung fanden. Die Unsicherheiten der Koeffizienten a_j und b_j wurden über eine Monte Carlo Methode durch Hinzufügen von Rauschen zu $y_{k,j}$ und $x_{k,j}$ bestimmt (das Rauschen entsprach einer Gaußverteilung der Breite $\sigma_{x_{k,j}}$ bzw. $\sigma_{y_{k,j}}$). Entsprechend Tab. 3.5 beträgt der additive Teil der Unsicherheit bei den bei 300 m durchgeführten Befliegungen im Mittel absolut 0,4 Reflektanzprozent in den DAEDALUS-Bändern 2 – 8 und 1,1 Reflektanzprozent in den Bändern 9 – 10. Die multiplikative Unsicherheit beträgt im Mittel relativ 3 % (Bänder 2 – 8) bzw. 7 % (Bänder 9 – 10). Für die Reflektanzen der 900 m-Befliegung finden sich additive Beiträge zur Unsicherheit zwischen absolut 0,8 – 2,5 Reflektanzprozent sowie multiplikative Beiträge von relativ 5 % – 13 %. Die Zunahme der Unsicherheit geht auf die größere Streuung der DAEDALUS-Reflektanzen innerhalb der gewählten Umgebung zurück. Abb. 3.26 zeigt exemplarisch einen Vergleich zwischen den transformierten DAEDALUS-Spektren und den Bodenmessungen. Man achte insbesondere auf die nicht zur Bestimmung der Rekalibrationskoeffizienten verwendeten Spektren der Flächen Kunstrasen und Naturrasen. Für das ebenfalls gezeigte Spektrum des Tennisplatzes liegt keine korrespondierende IRIS-Messung vor.

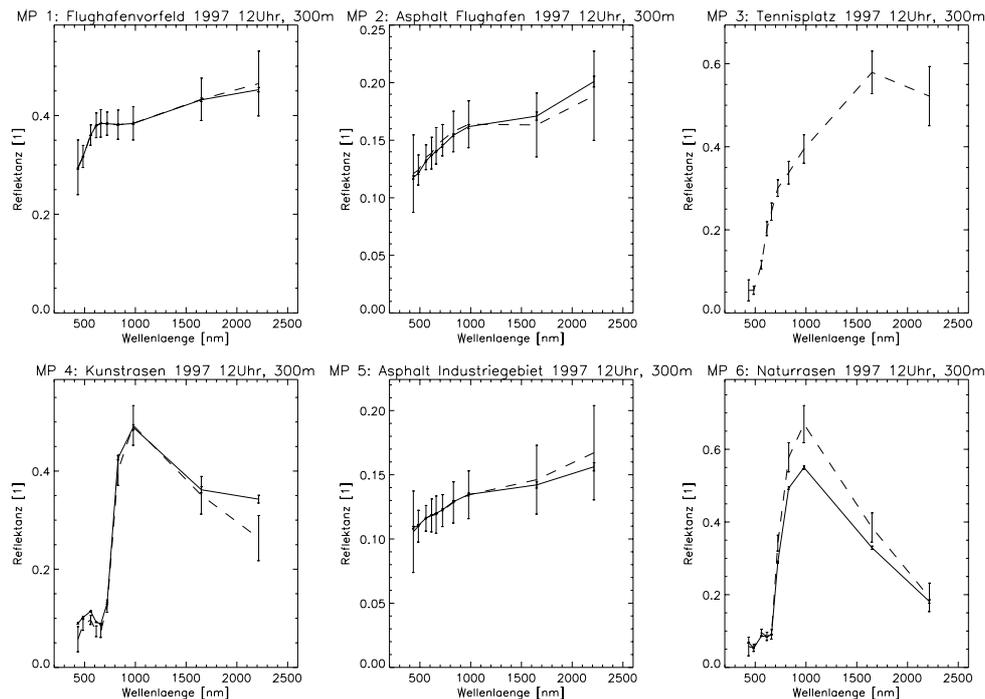
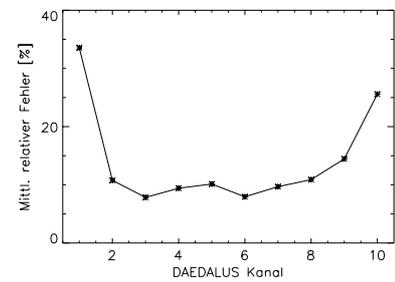
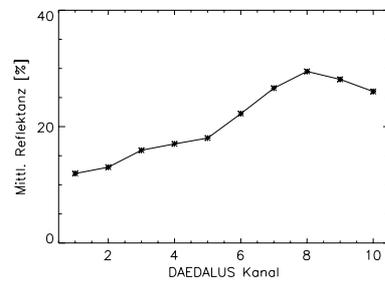


Abbildung 3.26: Reflektanzspektren der Bodenpunkte nach der Rekalibration auf die IRIS-Messungen unter Verwendung der Messungen der Meßpunkte (MP) 1, 2 und 5. Die durchgezogene Linie zeigt die IRIS-Messungen, die gestrichelte Linie die rekalibrierten DAEDALUS-Spektren. Für das ebenfalls gezeigte Spektrum des Tennisplatzes liegt keine korrespondierende IRIS-Messung vor.

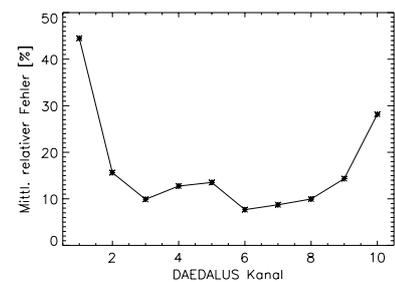
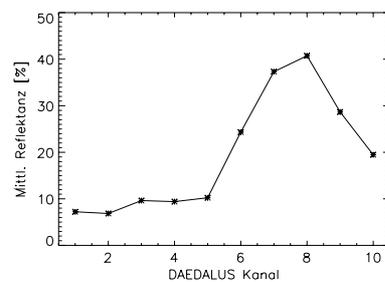
Abbildung 3.27 zeigt exemplarisch drei Reflektanzbilder der Nürnberg-Befliegung von 1997 (Mittags, Flughöhe 300 m). Neben einer Darstellung der Bildszenen zeigt die Abbildung auch die aus der Transformation resultierenden mittleren Reflektanzwerte sowie die zugehörigen mittleren relativen Unsicherheiten. Für die gezeigten Bildszenen variiert die mittlere Unsicherheit je nach Kanal zwischen etwa 7 % und 15 %. In Extremfällen steigt die Unsicherheit auf Werte um 25 % (Kanal 10) bis 45 % (Kanal 1). Die erhöhten Unsicherheiten sind darauf zurückzuführen, daß zum einen insbesondere der Kanal 1 schon an sich eine große Unsicherheit aufgrund des großen Detektorrauschens aufweist. Zudem ist die mittlere Reflektanz der Bildszenen im Kanal 1 mit am niedrigsten. Die erhöhte Unsicherheit der Reflektanz bei hohen Kanalnummern liegt an der verbleibenden absoluten Unsicherheit in den Reflektanzwerten (Fehler im Koeffizienten b in Tab. 3.5). Die mittleren Reflektanzen der Beispielszenen sind bei hohen Kanalnummern (Wellenlängen) zwar größer als im Bereich des Sichtbaren (bis Kanal 5), allerdings nicht in dem Maße wie die Unsicherheit in der absoluten Reflektanz.

Die mittleren Spektren von Wohn- und Gewerbegebieten sind mit dem Spektrum der Flughafenszene vergleichbar. Aufgrund von in solchen Gebieten häufiger vorkommenden Schattenflächen fallen die mittleren Reflektanzwerte etwas geringer aus. Die mittlere relative Unsicherheit beläuft sich für Wohngebiete auf etwa 10 % bis 17 % (Bänder 2 – 9).

'Flughafen'



'Landwirtschaft (Knoblauchland)'



'Parkanlagen'

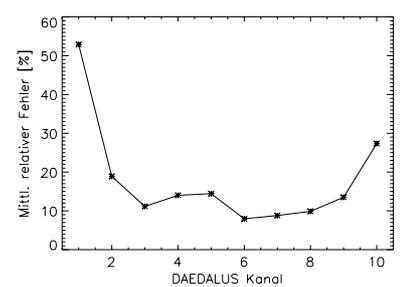
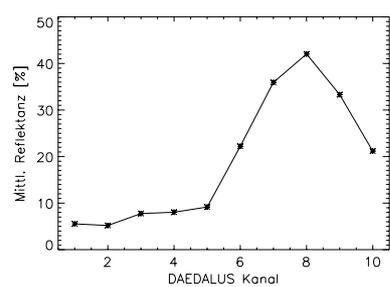


Abbildung 3.27: Beispiele zur Genauigkeit der Reflektanzbilder. Die linken Abbildungen zeigen exemplarisch Szenen mit verschiedenen Bodenreflektanzen (dargestellt ist Kanal 8, skaliert). Die jeweiligen beiden rechten Teilabbildungen zeigen die zugehörigen mittleren Reflektanzwerte und die sich für die Szenen ergebenden mittleren relativen Unsicherheiten.

		1994	1995	1997		
		11:12-11:16 Uhr UT 300 m	9:48-10:54 Uhr UT 300 m	6:57-7:50 Uhr UT 300 m	11:01-11:51 Uhr UT 300 m	10:22-10:48 Uhr UT 900 m
a	Kanal 1	1.042 ± 0.089	1.229 ± 0.082	1.197 ± 0.296	1.346 ± 0.168	1.554 ± 0.144
	Kanal 2	0.892 ± 0.032	1.146 ± 0.003	0.968 ± 0.034	1.132 ± 0.054	1.331 ± 0.093
	Kanal 3	0.850 ± 0.026	1.082 ± 0.005	1.011 ± 0.026	1.100 ± 0.047	1.288 ± 0.095
	Kanal 4	0.887 ± 0.029	1.111 ± 0.002	1.057 ± 0.025	1.156 ± 0.053	1.327 ± 0.098
	Kanal 5	0.836 ± 0.029	1.057 ± 0.006	1.048 ± 0.032	1.145 ± 0.057	1.290 ± 0.100
	Kanal 6	0.788 ± 0.026	1.054 ± 0.007	1.049 ± 0.025	1.153 ± 0.048	1.230 ± 0.105
	Kanal 7	0.752 ± 0.021	0.963 ± 0.008	1.101 ± 0.028	1.191 ± 0.063	1.340 ± 0.116
	Kanal 8	0.700 ± 0.026	1.013 ± 0.010	1.132 ± 0.053	1.252 ± 0.075	1.399 ± 0.130
	Kanal 9	1.126 ± 0.054	1.285 ± 0.051	1.442 ± 0.191	1.497 ± 0.084	1.525 ± 0.158
	Kanal 10	1.032 ± 0.022	1.402 ± 0.033	1.610 ± 0.082	1.84 ± 0.179	1.754 ± 0.235
b	Kanal 1	0.024 ± 0.018	0.004 ± 0.012	0.011 ± 0.046	0.017 ± 0.020	0.002 ± 0.017
	Kanal 2	0.008 ± 0.004	-0.008 ± 0.001	0.016 ± 0.008	0.008 ± 0.007	-0.010 ± 0.012
	Kanal 3	0.005 ± 0.004	-0.010 ± 0.001	0.010 ± 0.005	0.007 ± 0.005	-0.016 ± 0.014
	Kanal 4	0.004 ± 0.004	-0.010 ± 0.001	0.007 ± 0.005	0.002 ± 0.007	-0.018 ± 0.017
	Kanal 5	0.008 ± 0.004	-0.011 ± 0.001	0.005 ± 0.008	0.004 ± 0.008	-0.016 ± 0.017
	Kanal 6	0.004 ± 0.004	-0.011 ± 0.001	-0.001 ± 0.006	-0.001 ± 0.007	-0.030 ± 0.018
	Kanal 7	0.001 ± 0.004	-0.016 ± 0.002	-0.001 ± 0.006	-0.002 ± 0.009	-0.035 ± 0.020
	Kanal 8	0.004 ± 0.004	-0.011 ± 0.003	-0.002 ± 0.012	-0.003 ± 0.010	-0.031 ± 0.025
	Kanal 9	-0.002 ± 0.012	-0.005 ± 0.009	-0.025 ± 0.039	-0.015 ± 0.017	-0.031 ± 0.027
	Kanal 10	-0.009 ± 0.004	-0.006 ± 0.006	0.011 ± 0.013	0.003 ± 0.020	0.002 ± 0.024

Tabelle 3.5: Koeffizienten a_j , b_j zur Umrechnung der DAEDALUS-Reflektanzen $\rho_{D,j}$ auf die IRIS-Reflektanzen mittels $\rho_{D,tr,j} = a_j \cdot \rho_{D,j} + b_j$ $j = 1$ bis 10 für die DAEDALUS – Bänder.

3.2 BRDF in Luftbildern

Auf Basis der aufbereiteten und auf die IRIS-Messungen rekali­brierten Reflektanzbilder wurden die Spektren verschiedener Oberflächen aus den verschiedenen Flugstreifen miteinander verglichen. Es wurde zum einen geprüft, inwieweit BRDF-Effekte in den Luftbildern zu finden sind. Zum anderen dienten die Untersuchungen dazu, diejenigen Oberflächen bzw. bestimmte Oberflächencharakteristika zu finden, welche signifikante BRDF-Effekte zeigen. Anhand der gefundenen Ergebnisse wurde eine Auswahl von Oberflächen bestimmt, deren Eigenschaften der winkelabhängigen Reflexion durch Labormessungen näher untersucht wurden (siehe Kap. 4).

Die folgenden Abbildungen geben einen Eindruck von BRDF-Effekten, wie sie unter bestimmten Beleuchtungsbedingungen (Winkelkombinationen) in Luft- oder auch Satellitenbildern auftreten können. Abb. 3.28 illustriert die Aufnahmegeometrie, welche dem Vergleich zugrunde liegt. Die in der Abb.3.29 dargestellten Bildszenen wurde aus zwei Aufnahmen entnommen, welche mit einem Zeitabstand von wenigen Minuten entlang parallel gelegener Flugbahnen geflogen wurden. Durch den geringen Zeitabstand liegen für beide Flugstreifen in guter Näherung die gleichen Beleuchtungswinkel vor. Durch die unterschiedlichen Flugbahnen erscheint jedoch die Szene unter verschiedenen Beobachtungswinkeln.

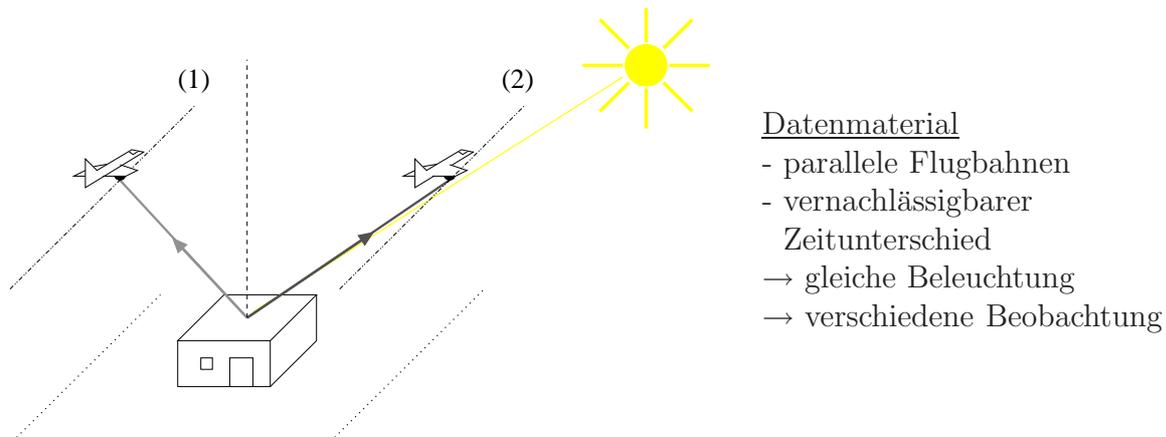


Abbildung 3.28: Illustration der Beleuchtungsgeometrie, welche der Abbildung 3.29 zugrunde liegt. Aus zwei mit einem Zeitabstand von wenigen Minuten entlang parallel gelegener Flugbahnen geflogener Flugstreifen wird eine Bildszene unter gleichen Beleuchtungswinkeln, aber verschiedenen Beobachtungswinkeln aufgenommen. Der Sensor beobachtet die Szene in dem Flugstreifen (1) gegen die Sonne (Vorwärtsstreurechtung), im Flugstreifen (2) beobachtet der Sensor mit der Sonne (Rückwärtsstreurechtung).

Aufgrund des geringen Zeitunterschiedes zwischen den beiden Aufnahmen wissen wir zudem, daß sich zwischen den Bildszenen keine gravierenden Änderungen ereignet haben (sicherlich gibt es Fahrzeugbewegungen o.ä., aber Änderungen an uns interessierenden Dachbedeckungen können ausgeschlossen werden).

Vergleicht man die beiden Bildausschnitte der Abb. 3.29, so zeigen in diesem Bei-



Zeit: $\approx 11:12$ UT,
Vorwärtsstreuung

Zeit: $\approx 11:22$ UT,
Rückwärtsstreuung

Abbildung 3.29: Beispiel zur Illustration von BRDF-Effekten in Luftbildern. Exemplarisch dargestellt sind die korrespondierenden Reflektanzbilder im Kanal 7 des DAEDALUS. Die linke Abbildung entspricht einer Beobachtungsrichtung in Vorwärtsstreuung ('gegen die Sonne'), die rechte Abbildung zeigt die entsprechende Szene in Rückwärtsstreuung (mit der Sonne im Rücken).

spiel die meisten Flächen keine augenfälligen Unterschiede in ihren Reflektanzwerten (wie von einem Lambertstrahler erwartet). Eine Dachbedeckung erscheint jedoch in der linken Teilabbildung viel heller als in der rechten Teilabbildung und würde bei einer rechnergestützten Analyse zu Fehlinterpretationen führen (wenn wir Änderungen aufgrund des vernachlässigbaren Zeitunterschiedes nicht ausschließen könnten, würde wohl selbst ein menschlicher Bildauswerter auf eine verschiedene Dachbedeckung schließen).

Für eine systematischere Bestimmung der möglichen Stärke von BRDF-Effekten in Luftbildern wurden die mittleren Spektren ausgewählter Oberflächen miteinander verglichen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß bei der Berechnung der Reflektanzbilder von ebenen Oberflächen innerhalb der Bildszene ausgegangen wird. Dadurch wird die auf eine geneigte Fläche einfallende Strahlung je nach Neigungswinkel unter- bzw. überschätzt und somit sind selbst in den Reflektanzbildern noch Spitzdächer aufgrund ihrer wechselnden Helligkeit zu erkennen. Bei einem Vergleich der Reflektanzwerte einer einzelnen Fläche zwischen den verschiedenen Flugstreifen erwarten wir somit allein schon aufgrund dieses systematischen Fehlers stärkere Unterschiede, welche von BRDF-Effekten zu unterscheiden sind. Ausschließen lassen sich diese Effekte von der Betrachtung nur durch die Wahl von ebenen Flächen bzw. durch zusätzliches Wissen über die Dachneigung eines

einzelnen Hauses sowie dessen Orientierung im Bezug auf die Himmelsrichtung. In Verbindung mit dem Wissen über die Sonnenstände zum Zeitpunkt der Aufnahme ließe sich die einfallende Strahlungsflußdichte auf die jeweiligen Flächennormalen der Dachhälften umrechnen. In Ermangelung dieses Detailwissens um die Dachneigungen haben wir uns bei der Untersuchung auf (makroskopisch) ebene Dachflächen konzentriert. Hierzu griffen wir auf eine Bildszene eines Gewerbegebietes zurück, da dieses durch die Ansammlung von Hallen bzw. der verwendeten Blockbauweise eine größere Anzahl von Flachdächern bietet als z.B. die Altstadt. Abb. 3.30 zeigt einen Überblick über die verwendete Bildszene, das Gewerbegebiet um die 'Andernacher Straße', Nürnberg.

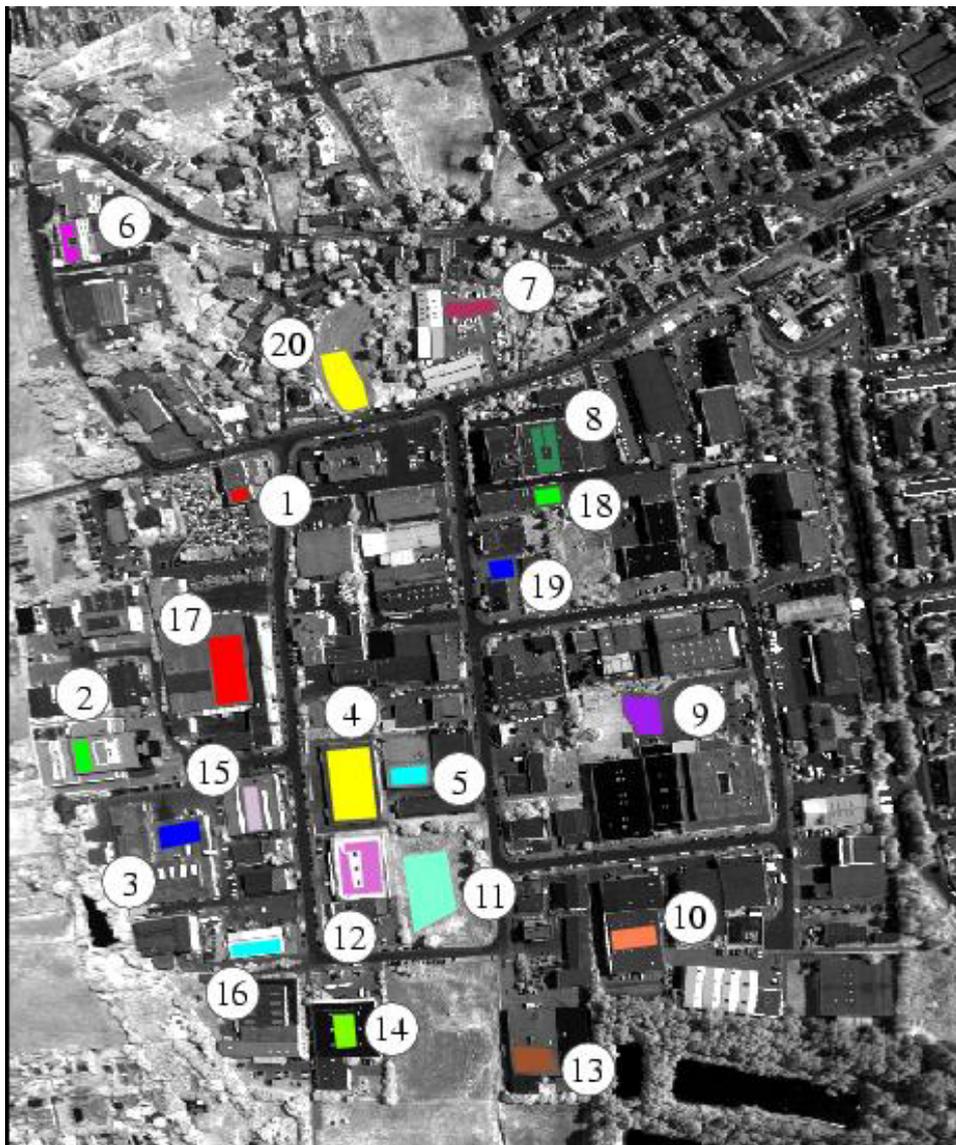


Abbildung 3.30: Gewählte Flächen für die Illustration von BRDF-Effekten in den Luftbildern. Die Spektren der gekennzeichneten Flächen wurden aus den verschiedenen Flugstreifen extrahiert und zu einem mittleren Spektrum (pro Fläche und pro Flugstreifen) zusammengefaßt.

Das Gewerbegebiet bzw. Teile des Gewerbegebietes finden sich in verschiedenen Flugstreifen, die zudem noch zu zwei verschiedenen Tageszeiten aufgenommen wurden. Dadurch liegen für die einzelnen Flächen zwischen drei bis maximal zehn Reflektanzwerte vor, die sich in den Sonnen-, Beobachtungs- oder auch im Azimutwinkel unterscheiden. Für die in Abb. 3.30 gekennzeichneten Flächen wurden die jeweils mittleren Spektren in den verschiedenen Flugstreifen bestimmt. Der Beobachtungszimutwinkel wurde aus den Flugdaten berechnet, der Beobachtungszenit wurde aus den Zenitwinkeln der für die Mittelung eines Dachspektrums verwendeten Bildelemente bestimmt. Die zur Zeit der Aufnahme vorliegenden Beleuchtungswinkel der Sonne wurden mit Hilfe des Programms 'Sunposition'¹⁶ von R. Wiemker bestimmt. Dieses Programm hat sich u.a. in [Rot97] bewährt und zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungen ähnlicher Programme (z.B. [AUS00]).

Die Abbildungen 3.33 bis 3.37 zeigen die für die verschiedenen Flächen bestimmten mittleren Reflektanzfaktoren. Aufgrund der Vielzahl der Variablen der BRDF (je zwei Zenit- und Azimutwinkel sowie die Wellenlänge) sind diese in zwei verschiedenen Illustrationsformen dargestellt. 3D-Polardarstellungen geben eine anschauliche Darstellung von Beobachtungs- und Beleuchtungsgeometrie und eine 2D-Darstellung ermöglicht einen einfacheren Wertevergleich. Alle dargestellten Werte wurden über die Kanäle 4 und 5 des DAEDALUS (Wellenlängen 605-625 sowie 630-690 nm) gemittelt¹⁷. Zudem wird in den Darstellungen zwischen Morgens- und Mittagsbefliegung unterschieden. Die Unterscheidung erfolgt in den 3D-Darstellungen durch separate Plots, in der 2D-Darstellung anhand von Farbe. Die relative Unsicherheit der Werte innerhalb einer Befliegungskampagne beträgt etwa 2% aufgrund atmosphärischer Schwankungen. Aufgrund der Unsicherheiten in der Bestimmung der absoluten Reflektanz ist ein Unterschied der Werte zwischen Morgens- und Mittags-Befliegung von absolut 0.002 [1/sr] sowie relativ 3% möglich.

Der Aufbau der 3D-Plots ist in Abb. 3.31 beschrieben. In den 2D-Plots sind für eine anschaulichere Darstellung exemplarisch die Abhängigkeit vom Relativwinkel zur geometrischen Spiegelungsrichtung (durch '+' gekennzeichnet) sowie zur geometrischen Rückstreurichtung (durch '*' gekennzeichnet) aufgetragen. Eine Illustration zu den Winkeln ist in Abb. 3.32 zu finden. Ein einzelner Plot zeigt dadurch zum einen die Stärke von gefundenen BRDF-Effekten für eine Fläche und gibt zum anderen einen Eindruck vom tendenziellen Verhalten der BRDF.

Die linke Hälfte eines einzelnen 2D-Plots zeigt die Abhängigkeit der BRDF in Abhängigkeit vom Abstand zur geometrischen Rückstreurichtung (als negatives Winkelmaß aufgetragen), d.h. je näher der Abstand an Null Grad ist, desto eher entspricht die vorliegende Beobachtungsrichtung einer Beobachtung der Fläche in Rückstreurichtung ('mit der Sonne im Rücken'). Ein Anstieg der BRDF in Richtung Null Grad innerhalb der negativ aufgetragenen Winkel zeigt einen 'hotspot'-Effekt an, wie er z.B. bei Vegetation bekannt

¹⁶<http://kogs-www.informatik.uni-hamburg.de/projects/censis/sunposition.html>

¹⁷Die Labormessungen wurden mit einem Laser der Wellenlänge 630 nm durchgeführt, der Mittelwert aus den Kanälen 4 und 5 des DAEDALUS wird als vergleichbar angenommen.

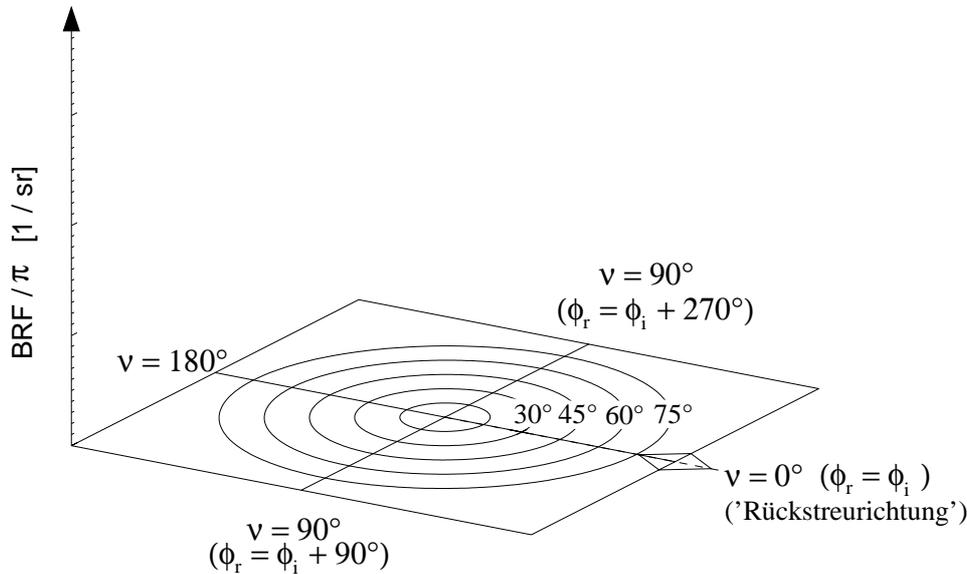


Abbildung 3.31: Beschreibung des Aufbaus der 3D-Darstellung. Es handelt sich um eine dreidimensionale Polardarstellung, in welcher die Meß- oder Modellwerte (hier nicht dargestellt) als Funktion der Beobachtungs- oder Beleuchtungswinkel aufgetragen werden können. Hier wird der Plot für eine feste Beleuchtungsgeometrie verwendet, als Variablen dienen der Beobachtungszenitwinkel θ_r sowie der Relativazimutwinkel ν (eine Funktion der Azimutwinkel ϕ_i, ϕ_r). Im Mittelpunkt der XY-Ebene ist der Zenitwinkel $\theta_r = 0^\circ$, der Azimutwinkel ist unbestimmt. Der Zenitwinkel ist durch den Abstand vom Mittelpunkt gegeben, die Kreise stellen Koordinaten mit konstantem Zenitwinkel dar. Der maximal mögliche Zenitwinkel beträgt 90° . Die Darstellungen in dieser Arbeit beschränken sich bei Daten des DAEDALUS-Sensors auf Zenitwinkel bis $\theta_r = 43^\circ$. Bei der Darstellung von Messungen am EGO (vgl. Kap. 4) sind Zenitwinkel bis $\theta_r = 70^\circ$ möglich. Auf vom Mittelpunkt ausgehenden Geraden ist der Azimutwinkel konstant.

ist und auch in den Luftbildern zu finden ist (siehe Plot 'Fläche 11' in Abb. 3.35).

Die rechte Hälfte eines einzelnen 2D-Plots zeigt die Abhängigkeit der BRDF in Abhängigkeit vom Abstand zur geometrischen Spiegelungsrichtung (als positives Winkelmaß aufgetragen), d.h. analog zu linken Plothälfte deutet ein in Richtung Null Grad steigender BRDF-Wert auf eine verstärkt spiegelnde Fläche.

In der 2D-Darstellung ist zu beachten, daß die relative Orientierung im Azimutwinkel zwischen Einfalls- und Beobachtungsrichtung nicht mehr ersichtlich ist. So können zwei verschiedene Beleuchtungsgeometrien das gleiche Abstandsmaß zugewiesen bekommen und eine Interpretation der Plots kann erschwert werden¹⁸. Die Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel sind ersichtlicher durch die Verbindung mit der 3D-Darstellung.

In einigen der Plots sind auch \diamond -Symbole zu finden. Diese BRDF-Werte wurden aus ei-

¹⁸Wenn z.B. eine Fläche aus der Richtung ($\theta_i = 10^\circ, \phi_i = 0^\circ$) beleuchtet wird, so haben z.B. die Beobachtungsrichtungen ($\theta_r = 30^\circ, \phi_i = 0^\circ$) und ($\theta_r = 10^\circ, \phi_i = 180^\circ$) den selben Abstand zur geometrischen Rückstreurichtung, nämlich 20° (in den Plots dann als -20° aufgetragen). Trotz des gleichen Abstandsmaßes würde man, z.B. für einen Spiegel, wohl verschiedene BRDF-Werte erwarten.

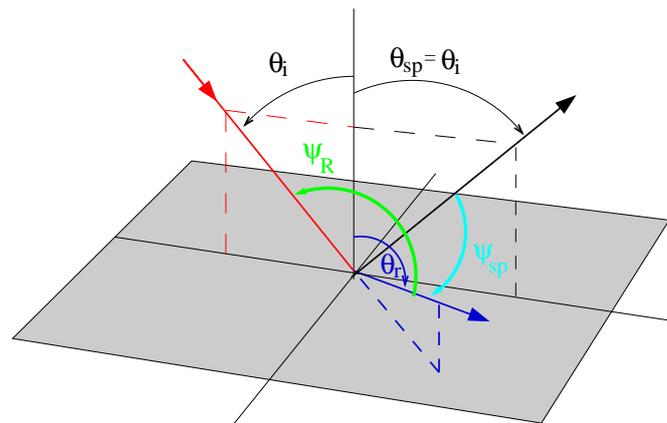


Abbildung 3.32: Zur Illustration der in den 2D-Darstellungen der Abb. 3.33 bis 3.37 aufgetragenen Winkel. Der Abstand zur geometrischen Rückstreuungsrichtung ist der Winkel Ψ_R (grün) zwischen der Beleuchtungsrichtung (rot) und der Beobachtungsrichtung (blau). Ψ_R ist in Abb. 3.33 ff. mit 'Hotspotwinkel' bezeichnet. Der Abstand zur geometrischen Spiegelungsrichtung ist durch den Winkel Ψ_{sp} gekennzeichnet (cyan). Dieser gibt den Winkel zwischen der Beobachtungsrichtung und der für glatte Flächen erwarteten Richtung des Spiegelungsreflexes (schwarz) an. Ψ_{sp} ist in Abb. 3.33 ff. mit 'Spiegelwinkel' bezeichnet.

nem Flugstreifen mit starker Wolkenbedeckung entnommen (siehe Abb. A.4 im Anhang), d.h. es kann für diese Werte nicht ausgeschlossen werden, daß ein nicht zu vernachlässigender Teil der einfallenden Strahlung die Oberflächen gar nicht erreicht hat. Diese Werte sind für Aussagen über das Streuverhalten von Oberflächen daher mit Vorsicht zu betrachten. Allerdings stellen die Werte, falls sie diesen starken systematischen Fehler aufweisen, zumindest eine untere Grenze für den Reflektanzwert einer Fläche bei der vorliegenden Winkelkombination dar.

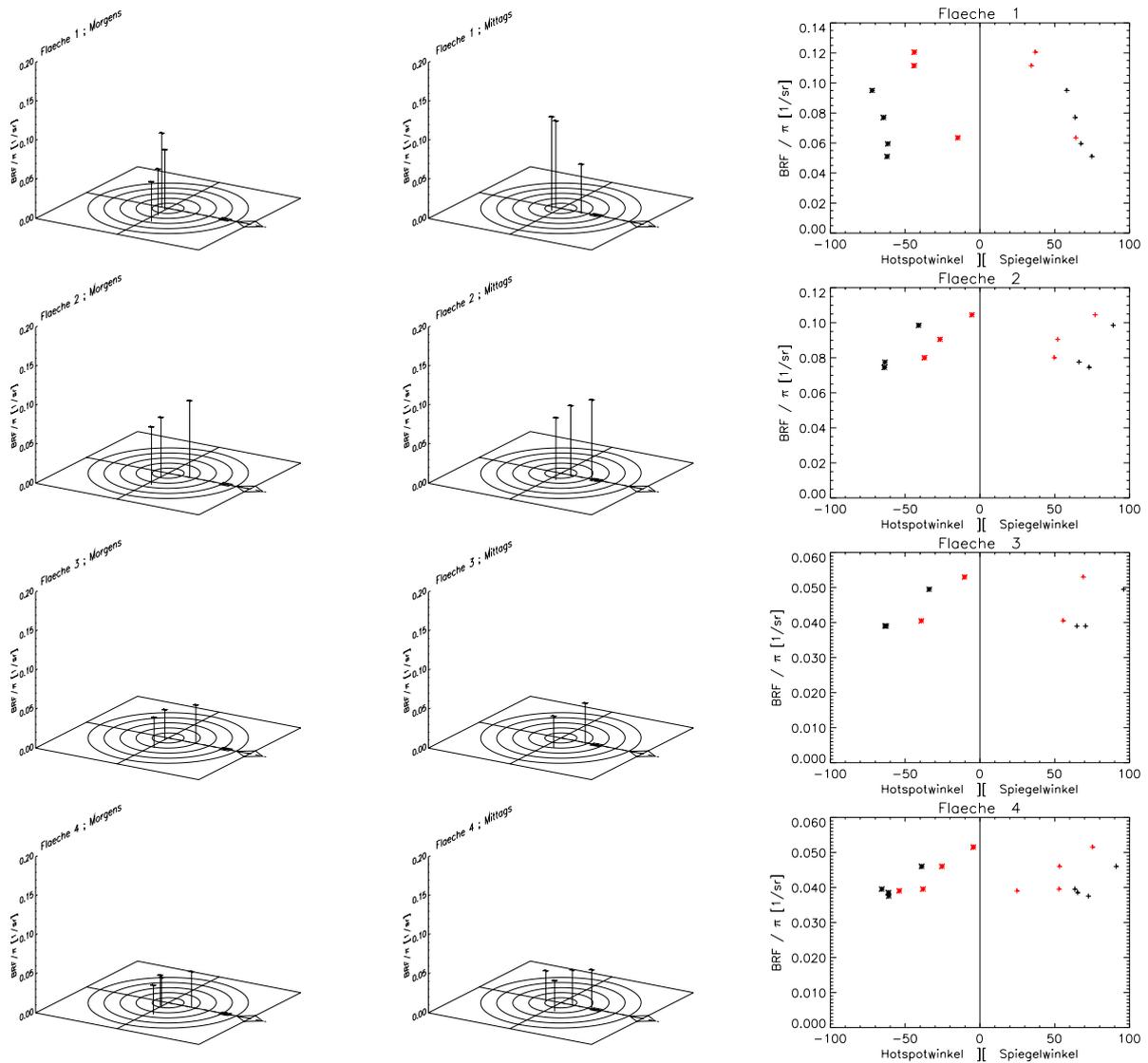


Abbildung 3.33: Reflektanzfaktoren verschiedener städtischer Oberflächen. Die ersten beiden Spalten zeigen Polardarstellungen der BRDF-Werte aus morgendlicher (links) und mittäglicher Befliegung (Mitte). Die rechte Spalte zeigt die Werte als Funktion des Abstandes zur geometrischen Rückstreurichtung (negative Winkel, Symbol '*') und als Funktion des Abstandes zur geometrischen Spiegelungsrichtung (positive Winkel, Symbol '+'). Rot dargestellte Werte entstammen den Daten der Mittags-Befliegung. Die Kopfzeile eines Teilplots bezeichnet die in Abb. 3.30 gekennzeichnete Fläche. Die dargestellten Werte sind die Mittelwerte der in Abb. 3.30 markierten Flächen (Pixelzahlen zwischen 60 und 2900) unter Berücksichtigung der Kanäle 4 und 5 des DAEDALUS (Wellenlängen 605-625 sowie 630-690 nm). In einigen der Plots sind ebenfalls auch \diamond -Symbole zu finden. Diese BRDF-Werte wurden aus einem Flugstreifen mit starker Wolkenbedeckung entnommen und sind mit Vorsicht zu betrachten (siehe Text).

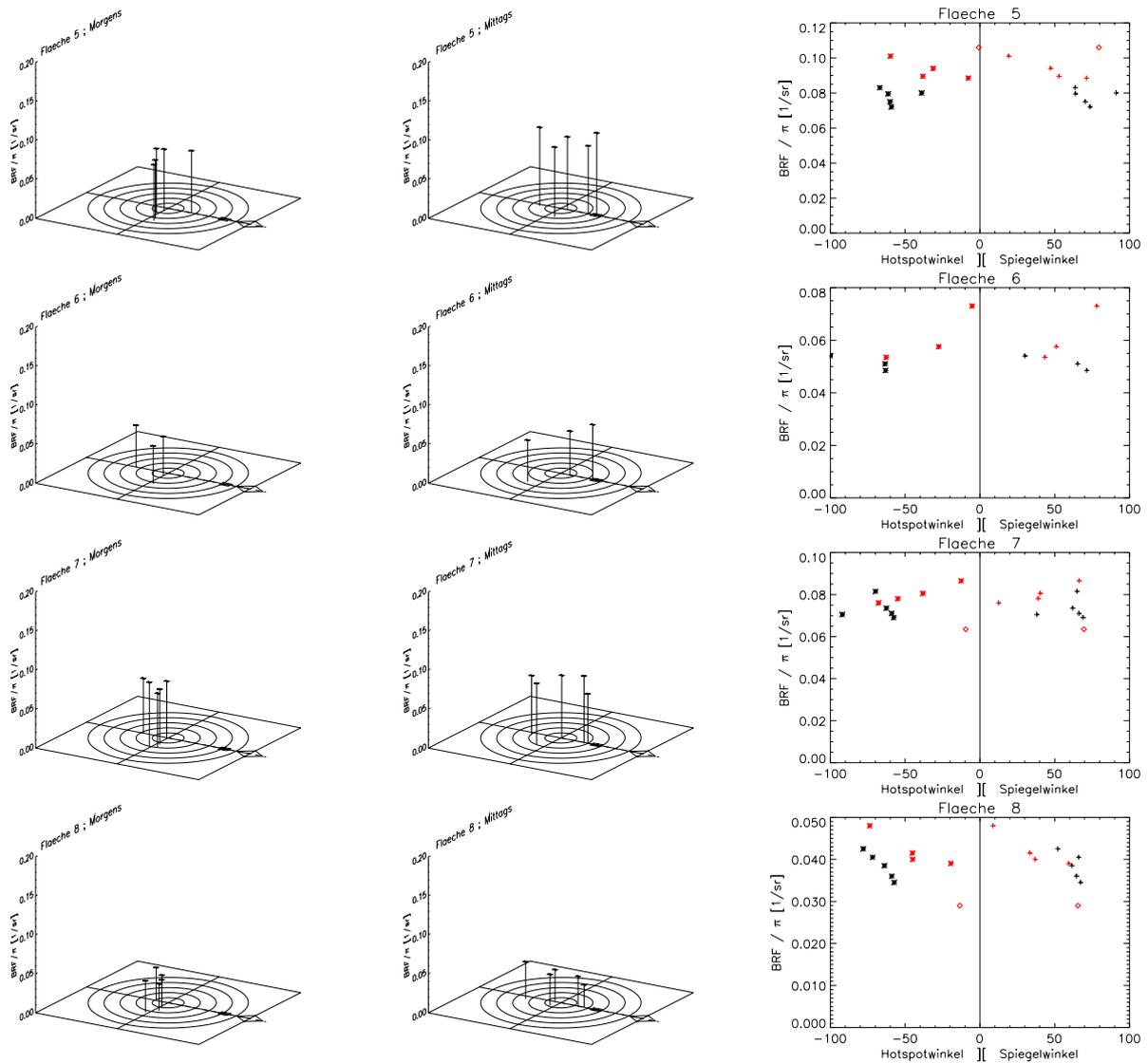


Abbildung 3.34: Reflektanzfaktoren verschiedener städtischer Oberflächen. Die ersten beiden Spalten zeigen Polardarstellungen der BRDF-Werte aus morgendlicher (links) und mittäglicher Befliegung (Mitte). Die rechte Spalte zeigt die Werte als Funktion des Abstandes zur geometrischen Rückstreurichtung (negative Winkel, Symbol '*') und als Funktion des Abstandes zur geometrischen Spiegelungsrichtung (positive Winkel, Symbol '+'). Rot dargestellte Werte entstammen den Daten der Mittags-Befliegung. Die Kopfzeile eines Teilplots bezeichnet die in Abb. 3.30 gekennzeichnete Fläche. Die dargestellten Werte sind die Mittelwerte der in Abb. 3.30 markierten Flächen (Pixelzahlen zwischen 60 und 2900) unter Berücksichtigung der Kanäle 4 und 5 des DAEDALUS (Wellenlängen 605-625 sowie 630-690 nm). In einigen der Plots sind ebenfalls auch \diamond -Symbole zu finden. Diese BRDF-Werte wurden aus einem Flugstreifen mit starker Wolkenbedeckung entnommen und sind mit Vorsicht zu betrachten (siehe Text).

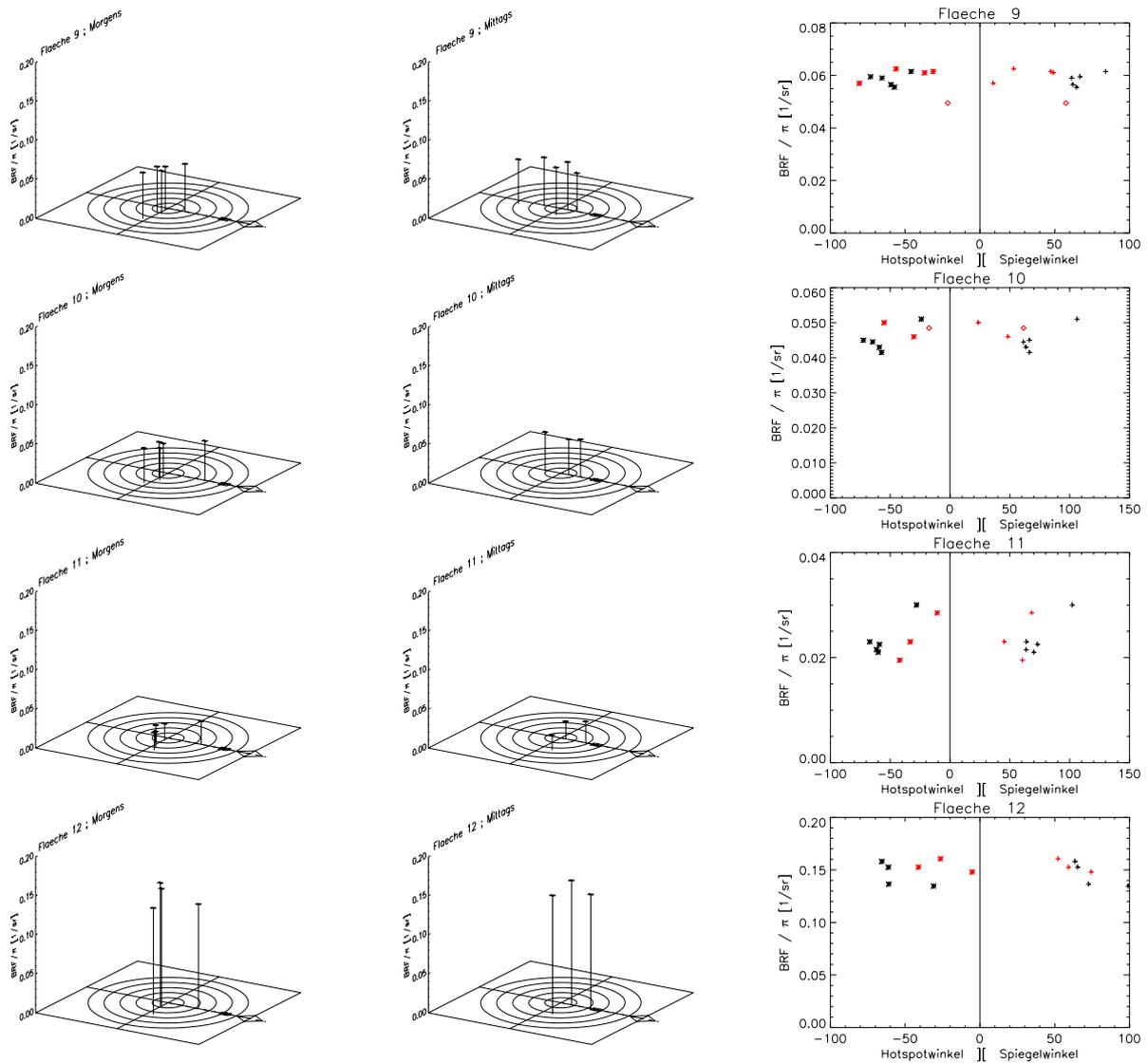


Abbildung 3.35: Reflektanzfaktoren verschiedener städtischer Oberflächen. Die ersten beiden Spalten zeigen Polardarstellungen der BRDF-Werte aus morgendlicher (links) und mittäglicher Befliegung (Mitte). Die rechte Spalte zeigt die Werte als Funktion des Abstandes zur geometrischen Rückstreurichtung (negative Winkel, Symbol '*') und als Funktion des Abstandes zur geometrischen Spiegelungsrichtung (positive Winkel, Symbol '+'). Rot dargestellte Werte entstammen den Daten der Mittags-Befliegung. Die Kopfzeile eines Teilplots bezeichnet die in Abb. 3.30 gekennzeichnete Fläche. Die dargestellten Werte sind die Mittelwerte der in Abb. 3.30 markierten Flächen (Pixelzahlen zwischen 60 und 2900) unter Berücksichtigung der Kanäle 4 und 5 des DAEDALUS (Wellenlängen 605-625 sowie 630-690 nm). In einigen der Plots sind ebenfalls auch \diamond -Symbole zu finden. Diese BRDF-Werte wurden aus einem Flugstreifen mit starker Wolkenbedeckung entnommen und sind mit Vorsicht zu betrachten (siehe Text).

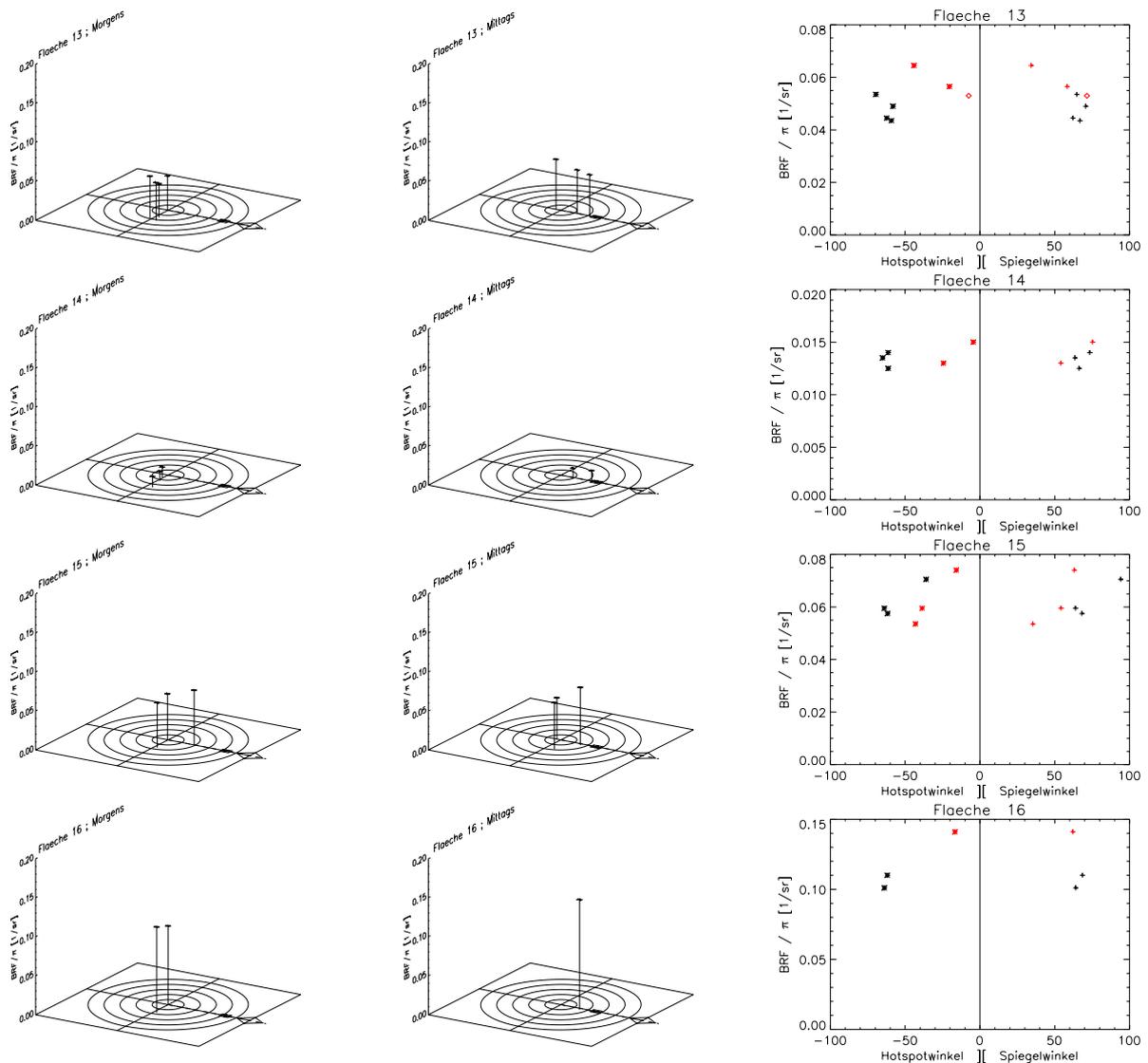


Abbildung 3.36: Reflektanzfaktoren verschiedener städtischer Oberflächen. Die ersten beiden Spalten zeigen Polardarstellungen der BRDF-Werte aus morgendlicher (links) und mittäglicher Befliegung (Mitte). Die rechte Spalte zeigt die Werte als Funktion des Abstandes zur geometrischen Rückstreurichtung (negative Winkel, Symbol '*') und als Funktion des Abstandes zur geometrischen Spiegelungsrichtung (positive Winkel, Symbol '+'). Rot dargestellte Werte entstammen den Daten der Mittags-Befliegung. Die Kopfzeile eines Teilplots bezeichnet die in Abb. 3.30 gekennzeichnete Fläche. Die dargestellten Werte sind die Mittelwerte der in Abb. 3.30 markierten Flächen (Pixelzahlen zwischen 60 und 2900) unter Berücksichtigung der Kanäle 4 und 5 des DAEDALUS (Wellenlängen 605-625 sowie 630-690 nm). In einigen der Plots sind ebenfalls auch \circ -Symbole zu finden. Diese BRDF-Werte wurden aus einem Flugstreifen mit starker Wolkenbedeckung entnommen und sind mit Vorsicht zu betrachten (siehe Text).

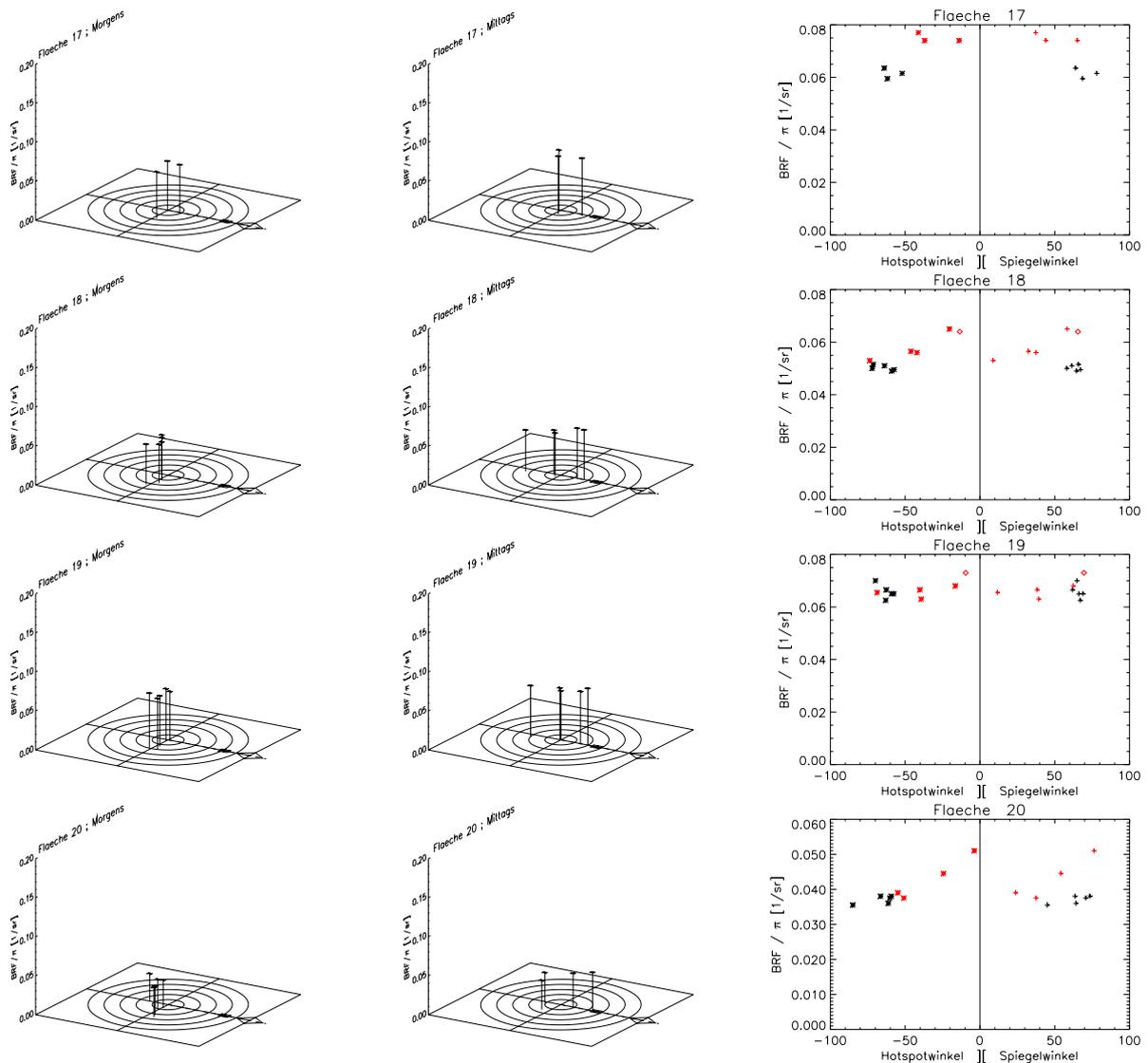


Abbildung 3.37: Reflektanzfaktoren verschiedener städtischer Oberflächen. Die ersten beiden Spalten zeigen Polardarstellungen der BRDF-Werte aus morgendlicher (links) und mittäglicher Befliegung (Mitte). Die rechte Spalte zeigt die Werte als Funktion des Abstandes zur geometrischen Rückstreurichtung (negative Winkel, Symbol 'x') und als Funktion des Abstandes zur geometrischen Spiegelungsrichtung (positive Winkel, Symbol '+'). Rot dargestellte Werte entstammen den Daten der Mittags-Befliegung. Die Kopfzeile eines Teilplots bezeichnet die in Abb. 3.30 gekennzeichnete Fläche. Die dargestellten Werte sind die Mittelwerte der in Abb. 3.30 markierten Flächen (Pixelzahlen zwischen 60 und 2900) unter Berücksichtigung der Kanäle 4 und 5 des DAEDALUS (Wellenlängen 605-625 sowie 630-690 nm). In einigen der Plots sind ebenfalls auch \circ -Symbole zu finden. Diese BRDF-Werte wurden aus einem Flugstreifen mit starker Wolkenbedeckung entnommen und sind mit Vorsicht zu betrachten (siehe Text).

Für die betrachteten Flächen im Gewerbegebiet zeigt sich, daß kein einheitliches Verhalten der Streuung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsgeometrie vorliegt. Der größte Teil der Flächen zeigt bei den gegebenen Winkelkombinationen eine erhöhte Streuung in Rückstreurichtung (Flächen 2, 3, 4, 6, 7, 11, 15, 16, 18, 20), vier der Flächen zeigen eine erhöhte Streuung in Vorwärtsrichtung (Flächen 1, 5, 8, 13). Auch sind Flächen zu finden, für die sich an den von uns gemessenen Winkelkombinationen ein eher lambert-sches Streuverhalten zeigt (Flächen 9, 12, 14, 19) oder die sowohl in Vorwärts- als auch in Rückwärtsrichtung eine Zunahme in der Reflektanz zeigen (Flächen 10, 17). Die relativen Unterschiede in der Reflektanz einer Oberfläche variieren dabei zwischen knapp 10% (z.B. Fläche 14) bis in Extremfällen hinauf zu 200 % (Fläche 1). Nach einer im Vorfeld der Labormessungen (siehe Kap. 4) durchgeführten Vorort-Besichtigung des Gewerbegebietes wurden verschiedene Oberflächen näher inspiziert. Durch die dabei gewonnenen Informationen läßt sich festhalten:

- Fläche 1 ist eine Dachbedeckung aus Metall. Das Flachdach wurde mit ebenen Blechbahnen beschlagen, dem Hauseigentümer nach handelt es sich um V2A-Stahl. Der extrem starke Anstieg der Reflektanz in Vorwärtsstreurichtung ist durch Spiegeleffekte plausibel.
- Viele Dächer, welche eine deutlich erhöhte Streuung in Rückwärtsrichtung zeigen (z.B. Flächen 2 bis 4), weisen eine sehr raue Oberfläche auf. Dabei handelt es sich zum einen um Kiesdächer, d.h. auf das Grundmaterial der Dachbedeckung (z.B. verschiedenartige Plastikbahnen/-folien) wurde eine Kiesschüttung (Kieseldurchmesser von etwa 2 bis 5 cm Durchmesser) aufgebracht. Vorstellbar ist die Zunahme der Streuung für diese Dächer dadurch, daß man bei der Betrachtung der Flächen aus der Vorwärtsrichtung eine Mittelung aus beleuchtetem Kies sowie kleineren Schattenflächen wahrnimmt. Nähert man sich der Rückstreurichtung, so sind aufgrund von Verdeckungen zunehmend weniger Schattenflächen sichtbar (in direkter Rückstreurichtung sind gar keine Schatten mehr sichtbar), wodurch eine höhere Reflektanz resultiert. Zum anderen handelt es sich bei den Dachbedeckungen um Bitumenbahnen, auf welche i.a. Sand (Quarz) aufgebracht worden ist¹⁹.
Bei der ebenfalls eine erhöhte Rückstreurichtung aufweisende Fläche 11 handelt es sich um eine von Vegetation bedeckte Fläche (wahrscheinlich brachliegendes Bauland). Ihr Reflexionsverhalten wird durch den bekannten 'Vegetations-hotspot' bestimmt.
- Bei der eine erhöhte Rückstreuung aufweisenden Fläche 7 handelt es sich um einen Parkplatz aus Betonsteinen. Diese besteht dem Augenschein nach aus dem gleichen Material wie eine weitere Parkplatzfläche (Fläche 9), bei welcher eine erhöhte Rückstreuung nicht festzustellen ist. Als Ursache für den Unterschied können die durch die Form der Betonsteine bedingten Zwischenräume zwischen benachbarten

¹⁹Soweit es für uns erkennbar war, da der direkte Zugang zu den Dachflächen nicht möglich war bzw. nicht gestattet wurde.

Betonsteinen gesehen werden (vgl. untenstehende Abbildung). Während die Betonsteine der Fläche 9 ziemlich bündig aneinander anschließen, findet sich bei Fläche 7 eine mit Sand / Kies gefüllte Fläche von etwa $3 \times 5 \text{ cm}^2$ im Zentrum vier aneinander grenzender Betonsteine. Denkbar ist, daß in den Sommermonaten Gras oder Pflanzen in diesen Zwischenräumen wachsen.



Beispielphotos zweier Parkplatzflächen, entstanden während einer Begehung des Gewerbegebietes 'Andernacher Str., Nürnberg (aufgenommen im Dezember '98). Die linke Abbildung zeigt ein Photo der Fläche 7, die rechte ein Photo der Fläche 9. In den DAEDALUS-Bildern festgestellte Unterschiede in der winkelabhängigen Reflexion der beiden mit Betonsteinen erbauten Parkplatzflächen sind durch die unterschiedliche Form und der daraus resultierenden unterschiedlichen Zwischenräume denkbar.

- Die Flächen, die neben der Fläche 1 ein in Vorwärtsstreurichtung erhöhtes Reflexionsverhalten zeigen, sind mit Dachpappe bzw. Bitumenbahnen bedeckt. Soweit erkennbar war, handelt es sich bei dem Bitumen der Fläche 8 um eine besandete Dachpappe. Genauere Aussagen zu den Dachflächen 5 und 13 konnten vor Ort nicht gewonnen werden. Der Vergleich dieser Dachflächen mit uns besser bekannten Dachbedeckungen anhand von während der Befliegung aufgenommenen Luftphotos lassen darauf schließen, daß es sich bei der Dachbedeckung der Fläche 5 um hellgraue Kunststoffbahnen handelt. Die Dachfläche 13 weist in den Luftphotos starke Ähnlichkeiten (Breite einzelner Dachbahnen, Art der Oberlichter) mit Metaldächern auf.
- Die Dachbedeckungen der Flächen 10 und 17, die sowohl in Vorwärtsstreurichtung als auch in Rückstreurichtung eine erhöhte Streuung zeigen, sind aus Bitumen bzw. Dachpappe.

Folgen der Existenz von BRDF-Effekten bei städtischen Oberflächen in der Verarbeitung von Luft- und Satellitenbildern werden in Kap. 6 untersucht.

4 Labormessungen zur BRDF künstlicher Oberflächen

Die Labormessungen fanden zwischen dem 25.01. und 06.02.1999 am Goniometer EGO des Joint Research Center (JRC) in Ispra, Italien statt. Es wurden verschiedene künstliche Oberflächen mit linear polarisiertem Laserlicht gemessen. Als Detektor kam ein Spektrometer Typ SE590 der Firma Spectron Engineering zum Einsatz. Diesem war bei Messungen in der Hauptebene (*principal plane*) ein Polarisationsfilter vorgeschaltet. Darüber hinaus wurden für zwei Proben Messungen außerhalb der Hauptebene durchgeführt. Diese fanden ohne Einsatz des Polarisationsfilters statt, lediglich die Polarisationsrichtung der Quelle wurde variiert (horizontale bzw. vertikale Polarisation). Ziel der Messungen ist es, das winkelabhängige Reflexionsverhalten von städtischen Oberflächen näher zu charakterisieren und durch physikalisch basierende mathematische Modelle zu beschreiben. Dazu stellt die Berücksichtigung der Orientierung der Polarisationsrichtung eine zusätzliche Informationsquelle dar.

Diese Messungen stellen die erste eingehende Verwendung von Laserlicht am EGO Goniometer dar und die erhaltenen Ergebnisse bilden eine grundlegende Basis für zukünftige Messungen am EGO. Teile dieses Kapitels finden sich in [RMH⁺00].

4.1 Meßaufbau

Das Goniometer besteht aus einem Grundkreis von etwa vier Metern Durchmesser. Senkrecht zur Kreisebene sind zwei bewegliche Viertelbögen montiert, welche sich rechnergesteuert in verschiedene Azimutpositionen fahren lassen. Die Viertelbögen dienen als Halterung für Lichtquelle bzw. Detektor. Lichtquelle und Detektor können, ebenfalls rechnergesteuert, in verschiedene Zenitpositionen gebracht werden. Abbildung 4.1 zeigt eine Illustration des Goniometers.

4.1.1 Lichtquelle und Detektor

Als Lichtquelle diente ein 8.0 mW HeNe Laser (linear polarisiert, $\lambda = 632.8$ nm) mit montierter Strahlaufweitung (engl. *beam-expander*). Der Durchmesser des aufgeweiteten Laserstrahls betrug etwa 5 cm bei einem Einfallszenitwinkel von $\theta_i = 0^\circ$ (Nadir). Eine Messung zum Polarisationsgrad ist im Anhang A.5.1 zu finden.

Als Detektor wurde das Spektrometer SE590 der Firma Spectron Engineering, Denver, Colorado, USA verwendet. Diesem wurde ein Polarisationsfilter (Spindler & Hoyer, *Typ*

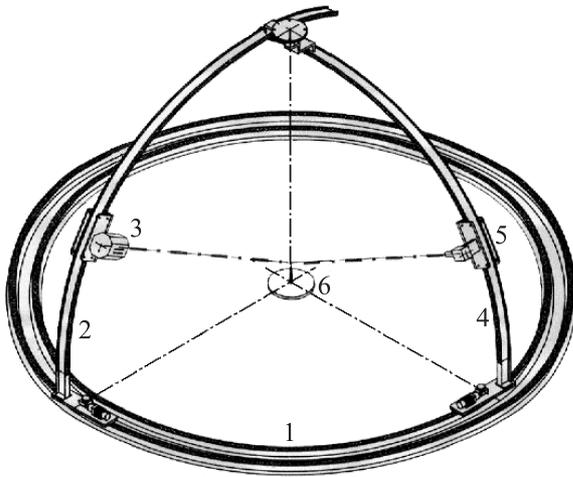


Abbildung 4.1: Goniometer des Joint Research Center (JRC), Ispra, Italien.

In der Geräteskizze (linke Abbildung) bezeichnen 1) Horizontaler Grundkreis, 2; 4) Vertikaler Viertelbogen, 3) Lichtquelle, 5) Detektor und 6) Probenhalter. Für die Verwendung unterschiedlichster Proben (z.B. flache oder hohe) gibt es verschiedene Probenhalter, welche in der Höhe verstellbar sind. Über diese muß die Probe derart justiert werden, daß die Probenoberfläche mit dem Schnittpunkt von Vertikalachse, Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung zusammenfällt. Die Skizze, ursprünglich veröffentlicht vom JRC, wurde überarbeitet, um aktuellen Änderungen Rechnung zu tragen.

Die rechte Abbildung zeigt den Autor beim Präparieren der Probe 'Rote Dachziegel' am Probenhalter. Im Hintergrund sind die Viertelbögen mit montiertem Detektor (links, $\theta_r = 70^\circ$) bzw. montierter Lichtquelle (rechts, $\theta_i = 30^\circ$) zu erkennen. Weiterhin ist ein Teil des Grundkreises zu sehen, entlang dessen die Viertelbögen bewegt werden können.

10K, rotating filters) vorgeschaltet.

Das Spektrometer basiert auf einer Diodenzeile mit 256 Elementen und überdeckt einen Wellenlängenbereich von 400 - 1100 nm. Die Dispersion von 700 über 256, bzw. etwa 2.8 nm pro Element, entspricht denen gängiger Spektrographen. Neben dem Grundaufbau (Standard-Spalt-Apertur) kann das Spektrometer mit verschiedenen vorgeschalteten Optiken (siehe Anhang A.4) betrieben werden. Sofern nicht anders angegeben, wurden die Messungen im Grundaufbau des Spektrometers (Standard-Spalt) durchgeführt. Zur Vermeidung von Lücken im Meßspektrum ist der Aufbau des Spektrographen so ausgelegt, daß es zu einem Überlapp von benachbarten Kanälen kommt. Das Meßsignal von monochromatischem Licht verteilt sich dadurch auf mehrere Detektorelemente. Die volle Signalbreite auf halber Höhe vom maximal gemessenen Signal (*full width half maximum FWHM*) beträgt im Grundaufbau etwa 3 - 4 Detektorelemente bzw. etwa 12 nm ([Spe87b]). Die Signalbreite kann bei Verwendung von vorgeschalteten Optiken auf etwa 1 bis 2 Detektorelemente bzw. etwa 5 nm verringert werden. Abbildung 4.2 zeigt exemplarisch Messungen, die mit verschiedenen Optiken durchgeführt wurden. Idealerweise sollte die Signalform durch die Beugung am Spalt sowie am Gitter innerhalb des Detektors bestimmt sein. Da wir jedoch keine Beugungsminima in der Verteilung des Meßsignals

erkennen können, vermuten wir zusätzliche Effekte (z.B. Abbildungsfehler der Linsen, endliche Spalllänge, Streuung an optischen Elementen). Diese beeinflussen ebenfalls die Signalform, weshalb die jeweilige Signalbreite auf halber Höhe $FWHM$ durch die Anpassung einer Gauß-Funktion bestimmt wurde [FK93]. Für den Detektor im Grundaufbau (Standard-Spalt) ergibt sich die volle Signalbreite auf halber Höhe zu 13.4 nm, bei Verwendung der 15° -Gesichtsfeldoptik zu 12.6 nm und bei Verwendung der 1° -Gesichtsfeldoptik zu 4.6 nm. Die Ergebnisse decken sich mit den Angaben im Datenblatt [Spe87b]. Der geringe Unterschied in der Signalbreite bei Verwendung der 15° -Optik im Gegensatz zum Grundaufbau liegt darin begründet, daß in diesem Aufbau im wesentlichen der Standard-Spalt die Signalbreite bestimmt. Die Spaltbreite ist in diesem Fall kleiner als das von der vorgeschalteten Linse erzeugte Bild in der Spaltebene. Damit ist auch das kleinere Meßsignal bei Verwendung der 15° -Optik zu erklären.

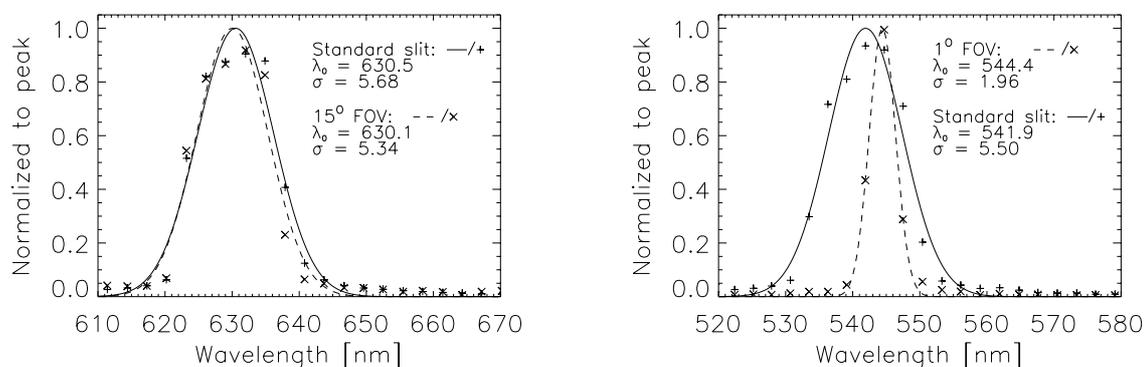


Abbildung 4.2: Verteilung des Meßsignals von monochromatischem Licht auf die verschiedenen Spektralkanäle des SE590-Detektors bei Verwendung von drei verschiedenen Detektoraufbauten. Die Meßsignale sind mit + bzw. × gekennzeichnet, die durchgezogene Linie zeigt die jeweilige Anpassung einer Gauß-Funktion $g = const \cdot \exp\{- (\lambda - \lambda_0)^2 / 2\sigma^2\}$. Die volle Signalbreite auf halber Höhe vom maximal gemessenen Signal $FWHM$ beträgt bei Verwendung des Standard-Spalt 13.4 nm, bei Verwendung der 15° -Gesichtsfeldoptik 12.6 nm (linke Grafik) und bei Verwendung der 1° -Gesichtsfeldoptik 4.6 nm (rechte Grafik). In der linken Grafik diente ein Laser der Wellenlänge 632.8 nm als Lichtquelle, in der rechten Grafik wurde ein Laser mit einer Wellenlänge von 543 nm verwendet. Messungen mit Standard-Spalt bei $\lambda = 543$ nm bzw. $\lambda = 632.8$ nm ergeben vergleichbare Breiten des Detektorsignals, wie ein Vergleich der durch '+' bzw. durchgezogener Linie gekennzeichneten Messungen zeigt.

4.1.2 Verwendete Probenflächen

Die Auswahl der in den Labormessungen gemessenen Proben wurde im Hinblick auf die Verarbeitung von Luftbildern mit insbesondere städtischem Inhalt getroffen. Das Augenmerk fiel deshalb auf verschiedene künstliche Oberflächen (vor allem Dachbedeckungen). Als Anhaltspunkt für die Auswahl von möglichen Probenflächen dienten die Ergebnisse

der Befliegung von Nürnberg im Jahre 1997, siehe Kapitel 3.2. In Abstimmung zu dem im selben Zeitraum durchgeführten Meßprogramm von G. Meister [Mei00] sowie früheren Ergebnissen zur Bestimmung der BRDF von verschiedenen Probenflächen [Rot97, MRW⁺98] wurden die folgenden drei Proben für ein umfassenderes Meßprogramm gewählt:

Spectralon

Bei Spectralon handelt es sich um eine diffus streuende Referenzfläche, welche von Lab-sphere Inc., North Sutton, NH, 03260, USA hergestellt wird. Das Streuverhalten wird i.a. als lambertsch angenommen, weshalb Spectralon häufig als Standard verwendet wird. Das verwendete Spectralon unserer Arbeitsgruppe hat eine Albedo von etwa $\rho \approx 0.51$ (vgl. Abbildung 4.4) und fand bereits in mehreren Arbeiten Verwendung. Die Abbildung 4.3 zeigt ein Photo unserer Referenzfläche, Abbildung 4.4 zeigt die Albedo in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Eine eingehende Beschreibung findet sich z.B. in [Mei96].



Abbildung 4.3: Photo der Probe 'Spectralon'.

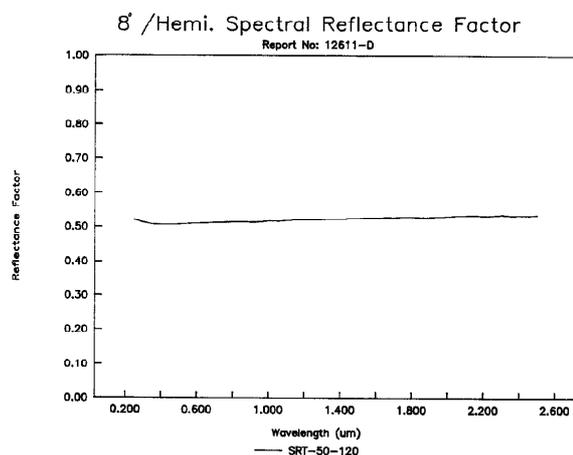


Abbildung 4.4: Albedo der Probe 'Spectralon' [Lab94].

Rote Dachziegel

Bei der Probenfläche 'Rote Dachziegel' handelt es sich um einen aus gebranntem Ton gefertigten Dachziegel im Längsschnitt-Format. Aufgrund seiner Form wird dieser auch mit dem Namen 'Biberschwanz' bezeichnet. Hergestellt / vertrieben wurde er unter der Artikelnummer 'HL 10' und der Farbbezeichnung 'naturrot' von der Firma Wittenberg Ziegel GmbH, Steyerberg, Deutschland. Der Ziegel selbst ist auf der Unterseite mit der Bezeichnung 'PR II 21-93 BORAL-STADLINGER LANGENZENN' versehen.

Wesentliche Eigenschaft dieser Ziegel ist ihre Ebenheit, welche im Gegensatz zu makroskopisch stark gewölbten Oberflächen eine praktikable Untersuchung unter Laborbedingungen zuläßt. Die auf der Oberfläche erkennbare Vorzugsrichtung ist auf schmale

Erhebungen entlang der Längsrichtung des Ziegels zurückzuführen. Diese hat auf die durchgeführten Messungen allerdings keinen Einfluß, da die Erhebungen durch den aufgeweiteten Laserstrahl nur vernachlässigbar beleuchtet wurden.



Abbildung 4.5: Photo der Probe 'Rote Dachziegel'



Abbildung 4.6: Photo der Probe 'Rote Dachziegel', Vergrößerung

Bestreute Dachpappe

Bei der Probenfläche 'Bestreute Dachpappe' handelt es sich um eine aus Bitumen hergestellte Dachbedeckung (im Grundmaterial eine Bitumenbahn von einigen Millimetern Dicke). Auf diese sind zusätzlich Sandkörner (Quarz) mit einem Durchmesser von etwa 1 bis 2 mm aufgebracht worden, wodurch sich eine rauhe und im Detail schwierig zu beschreibende Oberflächenstruktur ergibt. Die Verteilung der Sandkörner scheint zufällig zu sein, jedoch sehr homogen für Flächen größer als $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Wir gehen daher trotz der komplizierten Oberfläche von Rotationssymmetrie aus. Qualitativ erwarten wir für diese Probenfläche eine extrem nicht-lambertsche BRDF, nämlich eine Zunahme der BRDF mit zunehmendem Beobachtungszenitwinkel. Anschaulich ist diese Zunahme darauf zurückzuführen, daß ein nach Nadir auf die Probenfläche blickender Beobachter sowohl Teile des dunklen Bitumens als auch einen Teil der hellen Sandkörner sieht, d.h. eine Mittelung aus hellen und dunklen Teiloberflächen. Blickt der Beobachter unter einem großem Zenitwinkel auf die Probe, so verhindern die Sandkörner den Blick (ganz oder teilweise) auf die Bitumenbahn, so daß der Beobachter nur noch die helleren Sandkörner sieht.

Derartige Dachbedeckungen finden sich häufig auf Fertigungs- oder Lagerhallen in Gewerbegebieten, wie wir durch eine Begehung im Gewerbegebiet 'Andernacher Straße' feststellen konnten. Überdem finden diese Dachbedeckungen ebenfalls Verwendung für kleinere Schuppen / Garagen von Einzel- und Reihenhäusern sowie für Hütten in Kleingartenvereinen, so daß diese Art der Dachbedeckung - zumindest in Deutschland - eine weite Verbreitung gefunden haben dürfte.

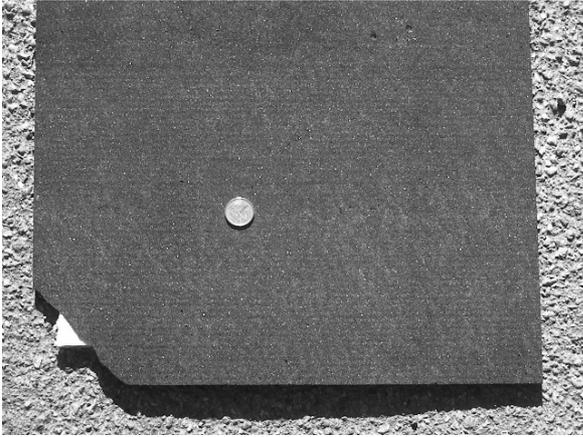


Abbildung 4.7: Photo der Probe 'Bestreute Dachpappe'



Abbildung 4.8: Photo der Probe 'Bestreute Dachpappe', Vergrößerung

4.2 Durchführung der Messungen

Es wurden Messungen ausgewählter Oberflächen bei verschiedenen Beleuchtungsgeometrien durchgeführt. Für die Messungen wurde als Lichtquelle ein HeNe Laser der Wellenlänge 632.8 nm verwendet. Dieser war mit einer Strahlaufweitung versehen, so daß der Strahldurchmesser auf der Probenoberfläche bei senkrecht einfallendem Licht etwa 5.2 cm betrug. Das von der Probe gestreute Licht gelangte über einen Polarisationsfilter in den 1.38 m von der Probenoberfläche entfernten Detektor. Dessen Gesichtsfeld war in Nadir-Stellung ($\theta_r = 0^\circ$) größer als das vom Laser beleuchtete Probesteil, sofern der Einfallswinkel weniger als bzw. gleich 55 Grad betrug. Die Messung zum Gesichtsfeld des Detektors ist im Anhang A.5.2 beschrieben.

Die Einstellung der Beleuchtungsgeometrien sowie die Datennahme erfolgte mit Hilfe eines an das Goniometer angeschlossenen Computers über Steuerdateien ('*scenario-files*'). Es wurden drei verschiedene Steuerdateien verwendet, diese sind mit einer Erläuterung im Anhang A.6 zu finden.

4.3 Bestimmung von BRDF-Werten

Die BRDF-Werte f_r berechnen sich nach (vgl. Kapitel 2.1.2):

$$f_r^{\text{Probe}}(\theta_i, \theta_r, \nu) = \frac{L_r(\theta_i, \theta_r, \nu)}{E_i(\theta_i, \phi_i) \cdot \cos(\theta_r)} \quad \left[\frac{1}{\text{sr}} \right] \quad . \quad (4.1)$$

Darin bezeichnet L_r die gemessene Strahldichte und E_i die auf die Probe einfallende Strahlungsflußdichte. $f_r^{\text{Sp}}(\theta_i, \theta_r, \nu)$ bezeichnet den bekannten BRDF-Wert des Spectralons bei einem Beleuchtungswinkel θ_i , einem Beobachtungswinkel θ_r und einem relativen Azimutwinkel ν (aufgrund der Rotationssymmetrie des Spectralons genügt die Angabe

eines relativen Azimutwinkels ν).

Die einfallende Strahlungsflußdichte E_i ließ sich nicht direkt bestimmen, da der Laser nicht direkt in den Detektor gerichtet werden konnte. Aufgrund einer fehlenden absoluten Strahldichte Eichung des verwendeten Detektors erübrigte sich ebenfalls die Bestimmung von E_i durch eine andere Meßapparatur. Die einfallende Strahlungsflußdichte bestimmten wir daher über eine indirekte Messung, siehe Kapitel 4.3.2.

4.3.1 Berechnung der reflektierten Strahldichte L_r

4.3.1.1 Dunkelstrom und Detektorrauschen

Das Spektrometer führt nach Erhalt des Signals zur Datennahme eine Reihe automatischer Messungen durch. Zuerst schließt es einen internen Verschuß (*shutter*) und mißt den Dunkelstrom, d.h. das durch thermisch ausgelöste Elektronen im Detektor erzeugte Meßsignal. Anschließend wird eine Messung mit einer Belichtungszeit von 8/60 s durchgeführt. Es bestimmt die maximale gemessene Amplitude und paßt die Belichtungszeit derart an, daß eine größtmögliche Amplitude gemessen werden kann (ohne Sättigung eines der Detektorelemente). Das System mißt dann mit angepaßter Belichtungszeit erneut den Dunkelstrom und die von der Oberfläche reflektierte Strahlung. Kontrollmessungen zur Überprüfung der Dunkelstromkorrektur (siehe unten) zeigten jedoch, daß die Dunkelstromkorrektur nicht oder nur unzureichend durchgeführt wird. Es wurden daher neben den Messungen unter Laserlicht in regelmäßigen Abständen Messungen mit geschlossener Detektoröffnung (lichtundurchlässige Schutzkappe montiert) durchgeführt. Durch diese wurde zum einen der Dunkelstrom D bestimmt, welcher sich weiterhin additiv in jeder Messung findet. Zum anderen wurde aus ihnen das Detektorrauschen bestimmt, welches in einer Einzelmessung zu finden ist. Dieses ergibt sich aus der Standardabweichung der Dunkelstrommessungen und wird als additiv angenommen.

4.3.1.2 Kontrollmessungen zur Dunkelstromkorrektur

Nach dem Datenblatt zum SE590 wird vor jeder Messung eine Dunkelstrommessung D_{int} mit Hilfe eines internen Verschlusses durchgeführt. Führt man also eine Messung mit geschlossenem Detektor durch (eine eigene Dunkelstrommessung D) und wird die geräteeigene Messung D_{int} vom Meßsignal abgezogen, so würde man im Idealfall ein Null-Signal als Ausgabe erhalten. Eine reale Messung ist allerdings durch Detektorrauschen gestört, sie schwankt näherungsweise einer Gauß-Verteilung folgend um einen Erwartungswert.

Das Meßsignal wird durch einen Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) umgewandelt, wobei nur positive Zahlen (Grauwerte) aufgezeichnet werden. Kleine Meßsignale, für die durch das Rauschen auch negative Signalspannungen auftreten, würden durch die Digitalisierung verfälscht. Anstelle einer negativen Zahl wird lediglich eine Null aufgezeichnet. Um dieses Problem zu umgehen, wird das Signal vor der Digitalisierung durch einen *Offset* angehoben, um welchen es später bei der Umrechnung in physikalische Größen wieder korrigiert werden muß.

Bei den von uns durchgeführten Dunkelstrommessungen mit verschlossener Detektoröffnung würden wir bei einer Korrektur auf den Dunkelstrom D_{int} erwarten, daß die Verteilung der korrigierten Meßwerte näherungsweise einer Gaußverteilung um den Erwartungswert Null folgt. Im Falle eines nicht ausreichenden Offsets wird durch die Aufzeichnung von lediglich positiven Zahlenwerten die Häufigkeit für Meßwerte gleich Null um die Anzahl aller negativen Werte erhöht.

Die Darstellung der Häufigkeitsverteilung zeigt einen Verlauf, welcher bei einem von Null verschiedenen Grauwert ein Maximum aufweist (vgl. Abbildung 4.9). Dieses fällt zu beiden Seiten hin gleichmäßig ab. Ebenfalls tritt ein Maximum bei dem Grauwert Null auf. Der Verlauf der Verteilung zeigt, daß eine weitere Korrektur auf den Dunkelstrom zu erfolgen hat. Hierzu wurde eine Gaußverteilung an die jeweiligen Häufigkeitsverteilungen angepaßt und der daraus bestimmte Erwartungswert a der Verteilung als Dunkelstrom D_k von jedem Detektorelement subtrahiert.

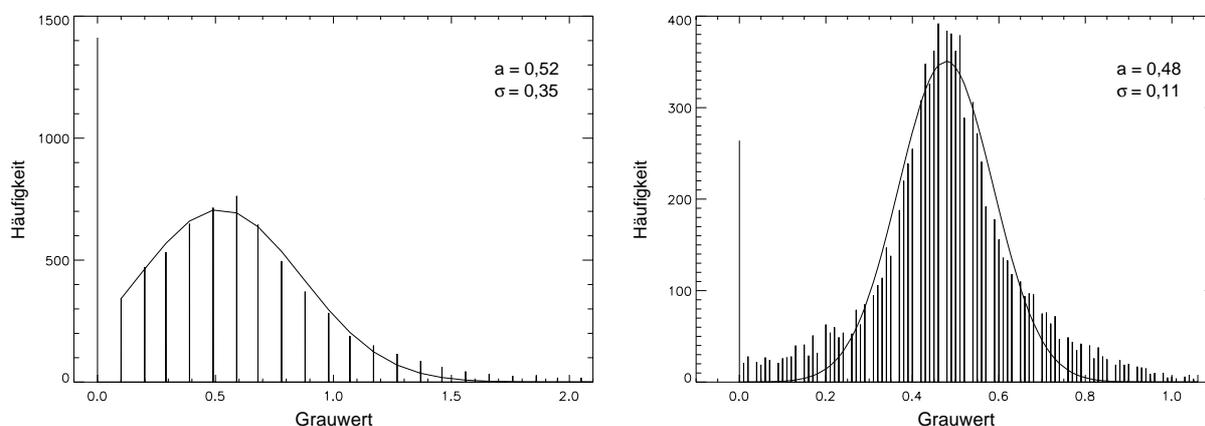


Abbildung 4.9: Häufigkeitsverteilung der Meßwerte (Grauwerte) der Dunkelstrommessungen. Die linke Grafik zeigt diese für Messungen ohne detektorinterne Mittelung, die rechte Grafik zeigt die Häufigkeitsverteilung bei detektorinterner Mittelung über 8 Messungen (*average mode*). Trotz der vom Detektor durchgeführten Dunkelstrommessungen D_{int} liegen die Maxima nicht bei einem Grauwert von Null, eine Korrektur ist demnach nur unzureichend erfolgt.

Weiterhin zeigt jede Grafik eine an die jeweilige Häufigkeitsverteilung angepaßte Gauß-Funktion $f = A \cdot e^{-(x-a)^2/2\sigma^2}$ mit den zugehörigen Parametern. Aus diesen ist zum einen die durch den Parameter a gegebene Größe des Dunkelstroms ersichtlich, zum anderen zeigt sich die Verringerung von σ durch die detektorinterne Mittelung mehrerer Messungen (auf etwa $1/3$ gegenüber den Messungen ohne detektorinterne Mittelung).

4.3.1.3 Berechnung der reflektierten Strahldichte L_r

Das von einer Probe reflektierte Laserlicht verteilt sich über mehrere Detektorkanäle k (vgl. Kapitel 4.1.1). Nach der Korrektur des Meßsignals M auf den Dunkelstrom D_k wurden die entsprechenden Detektorkanäle zur Bestimmung der reflektierten Strahldichte L_r aufsummiert.

$$L_r = \sum_k M_k - D_k \quad (4.2)$$

Die minimale Anzahl der zu summierenden Kanäle ist durch die in der Messung verwendete Detektoroptik festgelegt. Bei der Verwendung von monochromatischem Laserlicht wäre im Idealfall die Summation über alle Detektorkanäle möglich, da der Beitrag der nicht belichteten Detektorelemente im Mittel vernachlässigbar ist. Um Beiträge anderer Strahlungsquellen (z.B. Streulicht vom Computermonitor aufgrund von nicht exakt geschlossenen Vorhängen) so gering wie möglich zu halten, wurde hierauf allerdings verzichtet. Das Signal wurde bei Verwendung des Standard-Spaltes durch Summation von dreizehn Detektorkanälen bestimmt, d.h. aus dem bei der Wellenlänge des Lasers messenden Kanals sowie den je sechs links und rechts an diesen angrenzenden Kanälen. Die gewählten Summationsgrenzen korrespondieren zur entsprechenden Standardabweichung der in Kap. 4.1.1 bestimmten Gauß-Funktion. Abbildung 4.10 veranschaulicht exemplarisch die Bestimmung des Meßsignals in grafischer Form und illustriert die Notwendigkeit einer Dunkelstromkorrektur bei Messungen mit Laserlicht. Die linke Teilabbildung zeigt eine noch den Dunkelstrom D_k beinhaltende Messung. Die rechte Teilabbildung ist eine Ausschnittsvergrößerung der linken Teilabbildung und zeigt zusätzlich das um den Dunkelstrom D_k korrigierte Signal (durchgezogene Linie) sowie die gewählten Summationsgrenzen (gepunktete Linien) zur Berechnung der reflektierten Strahldichte L_r . Die Summationsgrenzen liegen bei $\lambda \approx 614$ nm bzw. $\lambda \approx 650$ nm. Der Gesamtbeitrag des Rauschens σ_{noise} aufgrund der Berechnung von L_r (Summation über 13 Detektorkanäle) beträgt etwa 0.4 [Grauwerte] für den *averaging detection mode*. Die Verwendung eines größeren Summationsintervalls hat keinen signifikanten Einfluß auf die letztendlich berechneten BRDF-Werte, wie Vergleichsrechnungen zeigen. Vergrößert man die Intervallgrenzen auf das Dreifache, so ist die relative Abweichung zwischen den mit kleinem und großen Summationsgrenzen bestimmten BRDF-Werten im Mittel unterhalb von 0.4 % (parallel dazu wächst auch die durch das Rauschen bedingte Unsicherheit in der gleichen Größenordnung).

4.3.2 Bestimmung der einfallenden Strahlungsflußdichte E_i

Zur Vermeidung einer möglichen Beschädigung der Detektorelemente sollte der Laser nicht direkt in den Detektor gerichtet werden, weshalb eine direkte Messung der einfallenden Strahlungsflußdichte E_i nicht möglich war. Diese wurde deshalb indirekt mit Hilfe einer wohlbekannten Referenzfläche (Spectralon der Fa. Labsphere, Boulder, Colorado) bestimmt. Für diese Referenzfläche ist die BRDF f_r^{Sp} bekannt [Mei96], ihre relative Genauigkeit $\sigma_{f_r^{\text{Sp}}}/f_r^{\text{Sp}}$ liegt bei 1 % bis zu 3 % (bei großen Zenitwinkeln). Aus der Messung der von dieser Referenz reflektierten Strahldichte L_r^{Sp} läßt sich damit die einfallende Strahlungsflußdichte berechnen (vgl. Gleichung 4.3).

Die BRDF f_r^{Sp} des Spectralons wurde durch Messungen mit unpolarisiertem Licht bestimmt [Mei96], weshalb bei diesen Messungen auf den Polarisationsfilter verzichtet wurde.

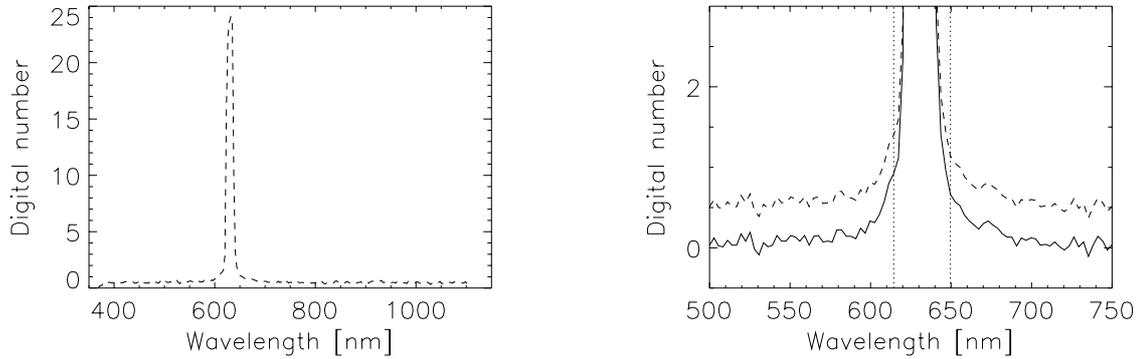


Abbildung 4.10: Beispiel zur Bestimmung der reflektierten Strahldichte L_r . Die linke Teilabbildung zeigt eine noch den Dunkelstrom beinhaltende Messung. Die rechte Teilabbildung ist eine Ausschnittsvergrößerung der linken Teilabbildung und zeigt zusätzlich das um den Dunkelstrom korrigierte Signal (durchgezogene Linie) sowie die gewählten Summationsgrenzen (gepunktete Linien) zur Berechnung der reflektierten Strahldichte L_r . Die gemessene Probenfläche war 'Bestreute Dachpappe', welche eine sehr niedrige Reflektanz hat. Die gemessenen Grauwerte geben einen Eindruck von der unteren Grenze gemessener Grauwerte und zeigen die Notwendigkeit einer Dunkelstromkorrektur bei Messungen mit Laserlicht. L_r ergibt sich in diesem Beispiel zu 126.8 Grauwerten, ohne die Dunkelstromkorrektur beliefe sich L_r auf 133.0 Grauwerte. Man beachte, daß sich das Signal aus der Summe mehrerer Detektorkanäle (hier 13 Kanäle) ergibt. Ohne Dunkelstromkorrektur liefert jeder Kanal einen Fehlbetrag in der Berechnung von L_r .

Die Messungen wurden sowohl bei senkrechter als auch bei horizontaler Polarisation des einfallenden Laserlichtes durchgeführt.

Durch Mittelung von $N = 219$ verschiedenen Einzelmessungen $L_r^{Sp,n}$ ergibt sich die mittlere einfallende Strahlungsflußdichte \bar{E}_i zu:

$$\begin{aligned} \bar{E}_i(\theta_i = 0^\circ) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{L_r^{Sp,n}}{f_r^{Sp,n} \cdot \cos \theta_{r,n}} \\ &= 32796,4 \text{ [Grauwert]} \end{aligned} \quad (4.3)$$

wobei $\theta_{r,n}$ der zur n-ten Messungen zugehörige Beobachtungszenitwinkel ist. Die Abhängigkeit der gemessenen Strahldichten vom Beobachtungszenit liegt an der Größe des Gesichtsfeldes, welches größer als die ausgeleuchtete Probenfläche ist. Der Fehler $\sigma_{\bar{E}_i}$ der Messung bestimmte sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz zu

$$\sigma_{\bar{E}_i} = 441,4 \text{ [Grauwert]} \quad ,$$

was einem relativen Fehler von 1.35 % entspricht. Dieser ist dominiert von der Unsicherheit der BRDF f_r^{Sp} des verwendeten Spectralons.

Bei Messungen in denen der Polarisationsfilter Verwendung findet, muß zusätzlich die Durchlässigkeit D_F des Polarisationsfilters berücksichtigt werden. Diese wurde aus mehreren Vergleichsmessungen mit / ohne Polarisationsfilter zu $D_F = 0.580 \pm 0.003$ bestimmt und ist ggf. in Gl. 4.3 und 4.6 zu berücksichtigen.

4.3.3 Weitere Fehlerquellen der Messung

4.3.3.1 Einstellen der Polarisationsrichtungen

Laser und Polarisationsfilter wurden anhand von markanten Punkten an ihren jeweiligen Halterungen ausgerichtet. Zur Überprüfung der Genauigkeit der Ausrichtung läßt sich eine Meßreihe nehmen, bei welcher lediglich die Orientierung des Polarisationsfilters verändert wurde. Das gestreute Licht setzt sich aus einer *like*-polarisierten Komponente A und einer *cross*-polarisierten Komponente B zusammen und man erwartet dann einen Verlauf des Meßsignals, welcher sich in Abhängigkeit von der gewählten Polarisatorstellung ändert. Gibt ω den Drehwinkel des Polarisators aus der Polarisationssebene an ($\omega = 0^\circ$ entspricht *like*-Polarisation, $\omega = 90^\circ$ entspricht *cross*-Polarisation), so ist das Meßsignal M gegeben durch

$$M = A' \cdot \cos^2(\omega + \alpha) + B' \quad , \quad (4.4)$$

mit neuen Konstanten A', B' aufgrund der Superposition. Durch die Phasenverschiebung α wird eine systematische Abweichung von der angenommenen Polarisationssebene der einfallenden Strahlung beschrieben. Eine solche würde man sehen, wenn z.B. die Orientierung des Lasers von der vorgegebenen Ebene abweicht.

Abbildung 4.11 zeigt das Ergebnis einer solchen Messung an der Spectralon-Referenz. Als '+' sind die gemessenen Grauwerte gegen die Polarisatorstellung (Drehwinkel gegen Polarisationssebene des Laserlichtes) aufgetragen. Die durchgezogene Linie zeigt die Anpassung der Gleichung 4.4 an die Meßwerte. Die Anpassung der Funktion liefert eine Phasenverschiebung von $\alpha = 1.1^\circ$. Dieses Ergebnis zeigt vernachlässigbare Unterschiede zur Anpassung der Funktion mit festgesetztem α gleich Null, weshalb im folgenden von α gleich Null ausgegangen wird. Die mittlere relative Abweichung der Meßwerte von der Kurve von 1.75 % wird dafür im Fehler der einzelnen Meßwerte berücksichtigt.

4.3.3.2 Systematische Fehler

Für einige Proben liegen mehrfach durchgeführte Messungen vor. So wurde z.B. die Messung der Spectralonfläche zu Beginn und Ende einer Meßreihe bei identischen Winkelstellungen wiederholt. Weder die Stellung der Laserquelle noch die Orientierung des Polarisators wurden zwischen diesen Messungen verändert, der Zeitunterschied zwischen den Messungen beträgt etwa 2.25 Stunden.

Die Unterschiede in den Messungen sind dadurch zum einen auf mögliche Änderungen in der Intensität der Laserstrahlung zurückzuführen. Zum anderen können Ungenauigkeiten in der waagerechten Ausrichtung der Probe zu Tage treten. Weiterhin sind

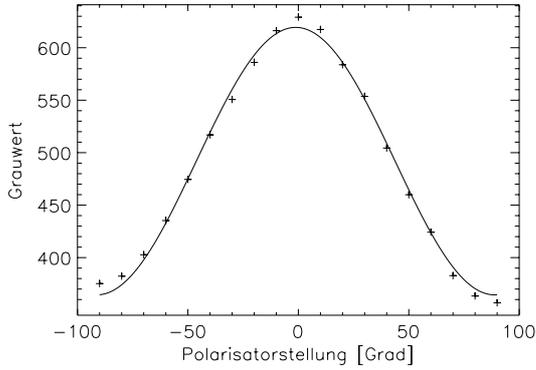


Abbildung 4.11: Meßsignal bei unterschiedlichen Polarisatorstellungen und festgehaltenen Ein- und Beobachtungswinkeln. Eine Polarisatorstellung von Null Grad bedeutet eine Messung bei gleicher Orientierung von Laserpolarisation und Polarisatorstellung (*like*-Polarisation). Die Messung fand in der Hauptebene statt, durch eine Drehung des Polarisators um $\pm 90^\circ$ wurde senkrecht zur Polarisationssebene des Lasers gemessen (*cross*-Polarisation).

Inhomogenitäten der Probe denkbar, da man den Meßpunkt auf der Probenfläche nicht genau wiederfindet (wir haben ihn schätzungsweise bis auf 0.5 cm genau ausgerichtet). Bei Messungen der Spectralonfläche kann die Oberfläche sicher als homogen angenommen werden.

Die mittlere relative quadratische Abweichung von 15 korrespondierenden Meßwertpaaren dient zur Beschreibung dieser weiteren systematischen Fehlerquelle σ_{setup} . Die relative Unsicherheit bestimmt sich zu $\sigma_{\text{setup}}/L_r = 3.7\%$. Für ähnliche Zeitspannen wurden Ungenauigkeiten eines kontinuierlich gemessenen Lichtquellsignals von 2–3 % gefunden [SHAP96].

4.3.4 Gesamtfehler

Mit der direkten Messung der reflektierten Strahldichte L_r und der indirekten Messung der einfallenden Strahlungsflußdichte E_i ergibt sich der BRDF-Wert f_r durch

$$f_r = \frac{L_r}{E_i} \quad \left[\frac{1}{\text{sr}} \right] \quad . \quad (4.5)$$

Unter der Annahme, daß $\sigma_{L_r}^2 = \sigma_{\text{noise}}^2 + \sigma_{\text{adjust}}^2 + \sigma_{\text{setup}}^2$ ergibt sich der Fehler des BRDF Wertes σ_{f_r} durch

$$\begin{aligned} \sigma_{f_r}^2 &= \left(\frac{\sigma_{L_r}}{E_i} \right)^2 + \left(-\frac{L_r \cdot \sigma_{E_i}}{E_i^2} \right)^2 \\ &= \left(\frac{L_r}{E_i} \cdot \frac{\sigma_{L_r}}{L_r} \right)^2 + \left(-\frac{L_r}{E_i} \cdot \frac{\sigma_{E_i}}{E_i} \right)^2 \\ &= f_r^2 \cdot \left[\left(\frac{\sigma_{\text{noise}}}{L_r} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{adjust}}}{L_r} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{setup}}}{L_r} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{E_i}}{E_i} \right)^2 \right] \quad . \quad (4.6) \end{aligned}$$

Mit den in den o.g. Unterkapiteln bestimmten Werten kann der relative Gesamtfehler σ_{f_r}/f_r berechnet werden :

$$\frac{\sigma_{f_r}}{f_r} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{noise}}}{L_r}\right)^2 + (1.75\%)^2 + (3.7\%)^2 + (1.34\%)^2} \quad , \quad (4.7)$$

mit σ_{noise} etwa 0.4 [Grauwerte] im *averaging detection mode* und etwa 1.3 [Grauwerte] im *non-averaging detection mode*. Der relative Beitrag zu dem (sehr kleinen) Signal in Abb. 4.10 ist $\sigma_{\text{noise}}/L_r \approx 0.32\%$ (*averaging mode*) bzw. $\sigma_{\text{noise}}/L_r \approx 1.02\%$ (*non averaging*). Bei Verwendung von Oberflächen stärkerer Reflektanz kann der Beitrag von σ_{noise} zum Gesamtfehler vernachlässigt werden (insbesondere im *averaging detection mode*), was zu einem relativen Gesamtfehler der gemessenen BRDF-Werte von

$$\frac{\sigma_{f_r}}{f_r} \approx 4.31\% \quad (4.8)$$

führt.

4.4 Meßergebnisse

Abbildung 4.12 zeigt exemplarisch¹ eine Auswahl der nach Gleichung 4.1 bestimmten BRDF-Werte für die Proben 'Spectralon' und 'Rote Dachziegel'. Ein einzelner Plot zeigt für einen festen Einfallswinkel θ_i die gemessenen BRDF-Werte (= BRDF / π) für verschiedene Kombinationen von Polarisationsorientierungen (*ss*, *sp*, *pp* und *ps*, vgl. 2.2) als Funktion des Beobachtungswinkels θ_r . Positive Beobachtungswinkel θ_r bedeuten, man beobachtet gegen die Lichtquelle (Vorwärtsstreuung, wie in der Illustration angedeutet). Bei negativen θ_r beobachtet man die Probe mit der Lichtquelle im Rücken (Rückwärtsstreuung). Innerhalb einer Spalte variiert der Einfallswinkel θ_i bei gleicher Probe, die rechte Spalte dient zur besseren Anschauung der Beleuchtungsgeometrie.

Zu erkennen ist, daß die Proben in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung ein unterschiedliches Streuverhalten zeigen. Bei *ss*-Polarisation zeigt sich bei festem Einfallswinkel θ_i bei beiden Proben ein starker Anstieg mit zunehmenden Beobachtungswinkel θ_r (z.B. bei der 'Roten Dachziegel' und einem Einfallswinkel $\theta_i = 45^\circ$ von etwa $f_r(\theta_r = -70^\circ) \approx 0.04 \text{ sr}^{-1}$ auf $f_r(\theta_r = +70^\circ) \approx 0.2 \text{ sr}^{-1}$, also um einen Faktor q von $q(\theta_i = 45^\circ) = f_r(\theta_r = +70^\circ)/f_r(\theta_r = -70^\circ) \approx 5$). Die Stärke des Anstiegs erhöht sich zudem mit zunehmenden Einfallswinkel ('Roten Dachziegel': $q(\theta_i = 55^\circ) \approx 9$, $q(\theta_i = 65^\circ) \approx 12$). Ein ähnliches Verhalten ist auch bei *pp*-Polarisation festzustellen, der Anstieg fällt jedoch geringer aus (deutlich zu sehen bei der Probe 'Rote Dachziegel': $q(\theta_i = 45^\circ) \approx 1$, $q(\theta_i = 55^\circ) \approx 1.3$, $q(\theta_i = 65^\circ) \approx 2.5$). Das bei glatten Flächen erwartete lokale Spiegelungsmaximum (bei $\theta_i = \theta_r$) ist in den Messungen nicht zu erkennen, vielmehr ist eher ein monotoner Anstieg (bei *ss* und *pp*) im gegebenen Meßbereich zu finden - denkbar ist allerdings noch ein zu großen Beobachtungswinkeln (zwischen $\theta_r = 70^\circ$ und $\theta_r = 90^\circ$) hin verschobenes lokales Maximum. Die Messungen bei Kreuzpolarisation (*sp*

¹Eine detaillierte Darstellung der Meßwerte erfolgt im Kapitel 5. Dort sind die Meßwerte zusammen mit den Modellergebnissen dargestellt.

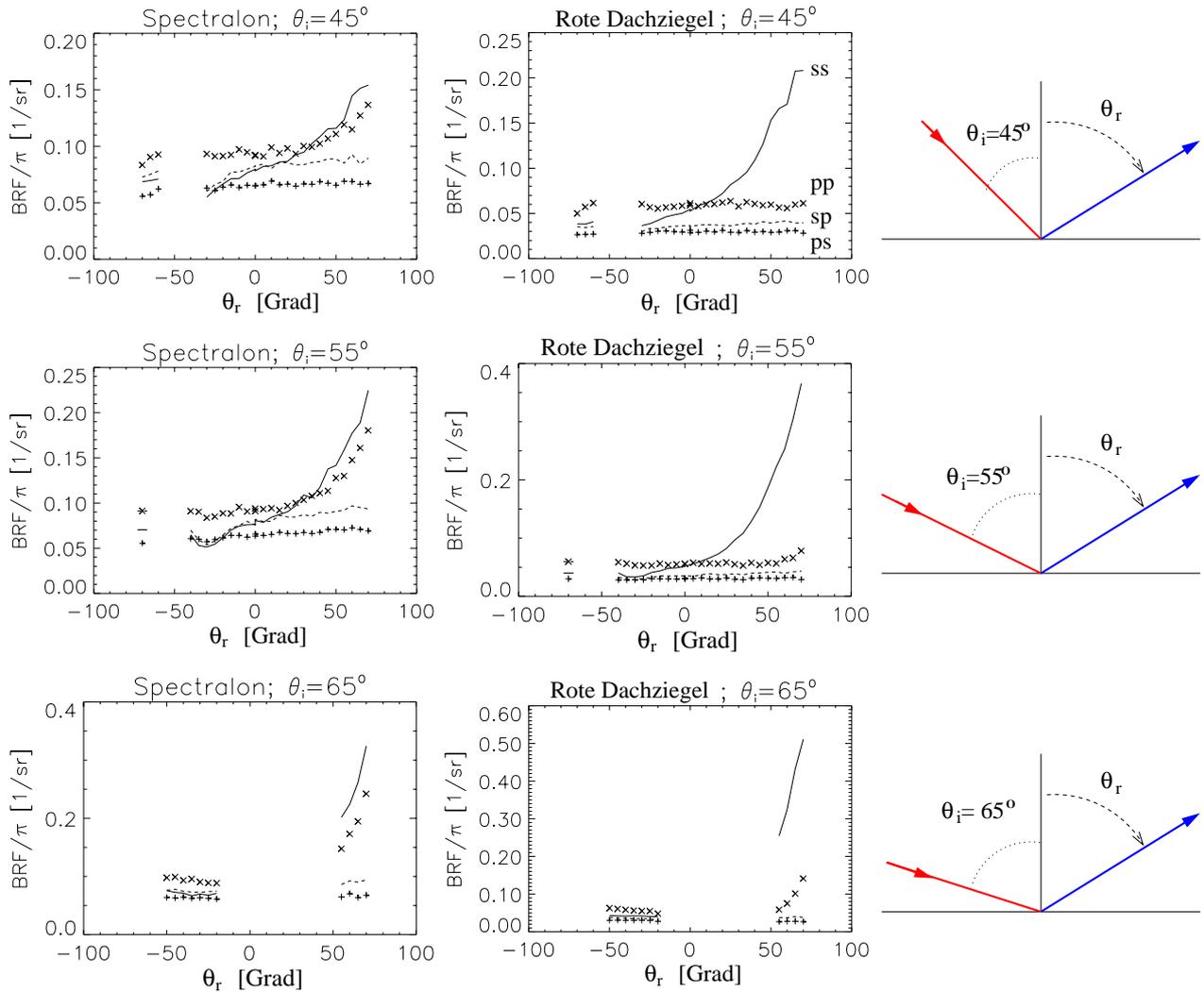


Abbildung 4.12: Beispiel gemessener BRDF-Werte (= BRF / π) für die Proben 'Spectralon' und 'Rote Dachziegel' in Abhängigkeit vom Beobachtungszenitwinkel θ_r . Innerhalb einer Spalte variiert der Einfallswinkel θ_i bei gleicher Probe. Eine einzelne Abbildung zeigt die Meßwerte bei verschiedenen Kombinationen der Polarisationsrichtung, z.B. bezeichnet *sp* den Fall, daß die einfallende Strahlung *s*-polarisiert ist und *p*-polarisierte Strahlung gemessen wurde. Der Übersicht halber sind die Meßwerte durch Linien verbunden oder einzelne Symbole dargestellt (ohne Fehlerbalken). Die durchgezogene Linie kennzeichnet Messungen bei *ss*-Polarisation, die gestrichelte Linie Messungen bei *sp*-Polarisation. Die Symbole \times bzw. '+' kennzeichnen Messungen bei *pp*- bzw. *ps*-Polarisation.

Die rechte Spalte dient der besseren Anschauung der Beleuchtungsgeometrie. Bei festem Einfallswinkel θ_i wurde der Beobachtungswinkel θ_r variiert. Bei positivem θ_r beobachtet man gegen die Lichtquelle (Vorwärtsstreuung, wie in der Illustration angedeutet), bei negativem θ_r beobachtet man die Probe mit der Lichtquelle im Rücken (Rückwärtsstreuung). Die Lücke in den Messungen bei 45° und 55° ist auf die Abmessungen der Geräte zurückzuführen (Lichtquelle und Detektor können sich nicht an der gleichen Position befinden), die Lücke in den Plots bei 65° liegt am begrenzten Gesichtsfeld des Detektors (die ausgeleuchtete Probenfläche wird bei kleinen Beobachtungszenitwinkeln nicht vollständig durch den Detektor erfaßt).

und ps) zeigen für die Proben 'Spectralon' und 'Rote Dachziegel' keine signifikanten Unterschiede zu einem Lambertstrahler. Allerdings bleibt festzuhalten, daß Unterschiede im Absolutwert zwischen den beiden Kreuzpolarisationsmessungen innerhalb einer Probenfläche zu sehen sind. Man beachte, daß das sich das Streuverhalten bei Kreuzpolarisation für andere Proben von einem Lambertstrahler unterscheiden kann. Abweichungen vom lambertschen Streuverhalten bei Kreuzpolarisation finden sich z.B. bei der Probe 'Bestreute Dachpappe', siehe Abb. 5.7.

Weiterhin festzuhalten ist, daß selbst die häufig als idealer diffuser Streuer angenommene Spectralonreferenz in der Hauptebene starke Abweichungen vom lambertschen Streuverhalten zeigt (Unterschiede im Faktor q zwischen 2 und 4, siehe Streuverhalten bei ss - bzw. pp -Polarisation in Abb. 4.12, linke Spalte).

5 Anpassung einer Modellfunktion

5.1 Diskussion zur Modellwahl

Im folgenden wird an die in Kapitel 4 beschriebenen Meßwerte der BRDF eine Modellfunktion angepaßt. Die Beschreibung der BRDF durch eine Funktion bringt folgende Vorteile:

- Eine Funktion ergibt eine gleichmäßigere BRDF als eine Interpolation zwischen den Meßwerten. Messungen von [FVPB93] zeigten für Spectralon eine sehr regelmäßige BRDF, ebenso bewährte sich dieses Verfahren bei früheren Feldmessungen [Mei96, Rot97].
- Abhängig von den Modellannahmen können die aufgezeigten Effekte auf physikalische Grundlagen zurückgeführt werden, sofern es sich um ein analytisches Modell handelt. Selbst im Falle einer empirischen Modellfunktion wird die Nutzung der erhaltenen BRDF vereinfacht.

Hierbei greifen wir auf eine aus der Literatur bekannte Modellfunktion von Torrance & Sparrow [TS67] zurück, welche zur Beschreibung von realen bzw. künstlichen Oberflächen des öfteren Verwendung gefunden hat ([MWM⁺98, Mei00, DGNK99, RMSB00]). Das Modell wird in Kap. 5.2 näher erläutert. Diesem auf geometrischer Optik basierendem Modell haben wir gegenüber dem auf Wellen-Optik basierendem Beckmann-Spizzichino-Modell [BS63] den Vorrang gegeben, da die vom Modell von Beckmann-Spizzichino für sehr glatte Flächen vorhergesagte Existenz eines Spiegelreflexes¹ in den Meßdaten nicht erkennbar ist. In den Messungen (siehe z.B. Abb. 4.12) zu sehen ist nur eine ebenfalls vorhergesagte 'Spiegelbeule'², welche das Spiegelungsverhalten bei rauhen Oberflächen dominiert (der Spiegelreflex verschwindet mit zunehmender Rauigkeit). Diese wird auch durch das Modell von Torrance & Sparrow beschrieben, welches für rauhe Oberflächen eine gute Übereinstimmung mit dem Modell von Beckmann-Spizzichino liefert [NIK91]. Zudem bedarf das Modell von Torrance & Sparrow keiner Annahmen über die Leitfähigkeit der Probe ('idealer Leiter' beim Beckmann-Spizzichino-Modell) und erlaubt dadurch ein breiteres Spektrum in der Zusammensetzung von möglichen Probenmaterialien. Zugunsten einer größeren Variabilität in der Probenzusammensetzung wurde auf die größere Variabilität

¹Dieser tritt bei gleicher Größe von Einfallswinkel und Beobachtungswinkel auf und ist in [NIK91] mit *specular spike* bezeichnet.

²Diese ist zu größeren Zenitwinkeln hin verschoben, in [NIK91] wird sie mit *specular lobe* bezeichnet.

in der Rauigkeit beim Beckmann-Spizzichino-Modell verzichtet. Nicht unberücksichtigt bleiben sollte schlußendlich auch die im Gegensatz zum Beckmann-Spizzichino-Modell einfachere mathematische Form des Modells von Torrance & Sparrow.

Die Anpassung der Modellfunktion geschieht nach der Methode der kleinsten Quadrate. Bezeichnen $f_{r,i}$ den Meßwert mit zugehörigem Meßfehler $\sigma_{f_{r,i}}$ und $f_r^{\vec{a}}$ den Wert der angepaßten Modellfunktion, so bedeutet dies die Minimierung der folgenden Größe M durch Variation der Anpassungsparameter \vec{a} :

$$M = \sum_{i=1}^N \left(\frac{f_{r,i} - f_r^{\vec{a}}}{\sigma_{f_{r,i}}} \right)^2, \quad (5.1)$$

N bezeichnet die Anzahl der Meßwerte. Die Größe M entspricht dabei der Testgröße des χ^2 -Tests (näheres ist z.B. in [Bra92], Seite 244 ff. zu finden), d.h. man kann durch sie prüfen, ob die Hypothese, daß die Meßwerte durch die verwendete Funktion beschrieben werden, abgelehnt wird oder nicht³.

5.2 BRDF-Modell Torrance & Sparrow

[TS67] schlugen ein BRDF-Modell vor, welches auf der Annahme basiert, daß man sich die Probenfläche als aus einfach spiegelnd reflektierenden V-förmigen Vertiefungen unendlicher Länge zusammengesetzt vorstellen kann. Die Verteilung der Neigungen der Oberflächenelemente wird als Gaußverteilung mit Erwartungswert Null angenommen (die meisten Oberflächenelemente sind 'flach', d.h. in der Horizontalen), woraus ein gaußförmiger Spiegelungspeak resultiert. Zur Illustration siehe Abbildung 5.1. Das Modell basiert auf Fresnel-Reflexion, welche nach Gl. 2.15 und Gl. 2.16 eine Funktion des komplexen Brechungsindex $\hat{m} = n + ik$ und der lokalen Einfallswinkel relativ zu den Oberflächenelementen ist (Fresnel-Reflektanz $F = F(\theta_i, \theta_r, \nu, \hat{m})$). Das Modell ist dadurch abhängig von der Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung. Ein 'Geometric-Attenuation-Factor' G trägt Abschattungen und Verdeckungen Rechnung, welche mit größer werdendem Zenitwinkel zunehmend an Bedeutung gewinnen [MRSB00]. Aufgrund der Breite der Spiegelung, wird G in dieser Arbeit nicht, wie in [MRSB00] vorgeschlagen, vernachlässigt. Die modellierten BRDF-Werte f_r sind gegeben durch:

$$f_r = a_0 + a_1 \cdot \frac{F(\theta_i, \theta_r, \nu, \hat{m}) G(\theta_i, \theta_r, \nu)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \cdot e^{-a_2^2 \alpha^2} \quad \left[\frac{1}{\text{sr}} \right], \quad (5.2)$$

wobei $\alpha = \alpha(\theta_i, \theta_r, \nu)$ den Winkel zwischen Nadir und der Normalen des spiegelnd reflektierenden Oberflächenelementes (die verwendete Einheit ist [Grad]) bezeichnet. a_0 ist eine Konstante und bezeichnet den diffusen Anteil, welcher als Lambertsch angenommen wird. a_1 bestimmt die Intensität der spiegelnden Reflexion und a_2 beschreibt die Breite des Spiegelungspeaks.

Man beachte, daß die Fresnel-Reflexion eine Funktion des lokalen Einfallswinkels θ'_i

³Anmerkung: Ein 'Nicht-ablehnen' bedeutet allerdings keine direkte Bestätigung der Hypothese.

Oberflächen / Modell-Annahmen im Modell Torrance & Sparrow

- Einfach spiegelnd reflektierende V-förmige Vertiefungen
- Neigungswinkel α der Oberflächenelemente Gaußverteilt um $\alpha = 0$
- Fresnel-Reflexion F mit kompl. Brechungsindex $\hat{m} = n + ik$
- Geometr. Abschwächung G für Abschattung und Verdeckung
- Mehrfachstreuungen ergeben diffuse Komponente (lambertsch)

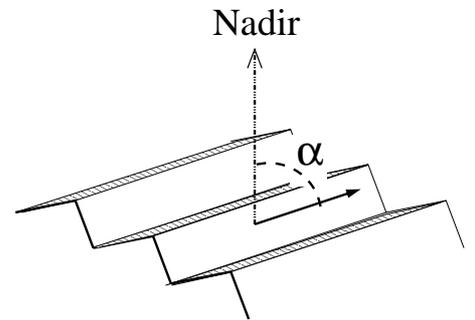
Zur Illustration des Neigungswinkels α der V-förmigen Vertiefungen

Abbildung 5.1: Kurzübersicht der Modellannahmen im Modell von Torrance & Sparrow

ist. Dieser bestimmt sich aus den in Gl. 5.2 genannten Zenitwinkeln θ_i, θ_r sowie dem Relativazimutwinkel ν durch

$$\cos 2\theta'_i = \cos \theta_i \cos \theta_r - \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \nu \quad . \quad (5.3)$$

Wir sehen die diffuse Komponente als verursacht durch Mehrfachstreuungen im Probenvolumen (man könnte sich auch einen Absorptions- und Reemissionsprozeß vorstellen; [TS67] nennen als Ursache der diffusen Komponente u.a. *internal scattering*, ohne die Wechselwirkung näher zu spezifizieren). D.h. wenn eine Probenfläche unterschiedlich starke Intensitäten in der spiegelnden Komponente bei unterschiedlichen Polarisationsrichtungen (*ss* oder *pp*) zeigt, so verbleiben verschiedene Anteile der einfallenden Strahlung zur Ausbildung der diffusen Anteile und wir erwarten unterschiedliche Modellwerte der diffusen Komponenten. Der Unterschied in den Spiegelungsintensitäten ist dabei nicht nur als ein Unterschied in den diffusen Komponenten a_{0SS}, a_{0PP} bei *like*-Polarisation zu suchen. Unter der Voraussetzung einer von der Polarisation unabhängigen Albedo würde dies zur Folge haben, daß die Komponenten der *cross*-Polarisation vom gleichen Betrag wären. Dem Widersprechen allerdings die Meßwerte des Spectralons, welche signifikante Unterschiede in den Messungen bei *cross*-Polarisation zeigen. Aus diesem Grund paßten wir das durch Gl. 5.2 gegebene Modell an die *ss*- und *pp*-Messungen unter Verwendung von zwei Koeffizienten a_{0SS}, a_{0PP} zur Beschreibung der diffusen Komponente an (je ein Koeffizient für jede Polarisationsrichtung). Die Koeffizienten a_1, a_2 und \hat{m} wurden als gleich für beide Polarisationsorientierungen gewählt⁴, da wir diese als von der Polarisationsrichtung unabhängige Eigenschaften der Probe interpretieren. Aus dem gleichbleiben-

⁴Die Anpassung des Modells an die Meßwerte bei *like*-Polarisation (*ss, pp*) erfolgte durch einen Doppelfit mit der Nebenbedingung, daß a_1, a_2 und \hat{m} für beide Polarisationsorientierungen gleich sind.

dem Brechungsindex \hat{m} folgt eine unterschiedliche Reflexion für s - oder p -Polarisation, vgl. Kap. 2.2. Die Beschreibung der Meßergebnisse bei *cross*-Polarisation geschieht durch je einen diffusen Anteil a_{0PS} bzw. a_{0SP} .

Die Verwendung des Modells von Torrance & Sparrow bei den vorliegenden Messungen erfolgt durch:

$$\begin{aligned}
 ss : f_{ss} &= a_{0SS} + a_1 \cdot \frac{F_{ss}(\theta_i, \theta_r, \nu, \hat{m}) G(\theta_i, \theta_r, \nu)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \cdot e^{-a_2^2 \alpha^2} \\
 pp : f_{pp} &= a_{0PP} + a_1 \cdot \frac{F_{pp}(\theta_i, \theta_r, \nu, \hat{m}) G(\theta_i, \theta_r, \nu)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \cdot e^{-a_2^2 \alpha^2} \\
 ps : f_{ps} &= a_{0PS} \\
 sp : f_{sp} &= a_{0SP}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

5.3 Anpassungsergebnisse

Die Abbildungen 5.2 bis 5.6 zeigen die Anpassungsergebnisse⁵ an die Meßwerte der verschiedenen Proben bei *like*- und *cross*-Polarisation. Die Verteilung der Neigung der V-förmigen Vertiefungen wurde für alle Proben als gaußverteilt um den Erwartungswert Null angenommen. Die durchgezogene Linie zeigt das Modellergebnis bei Verwendung der Koeffizienten aus Tab. 5.1, die Meßwerte sind als Fehlerbalken dargestellt.

Abb. 5.2 zeigt das Anpassungsergebnis des Modells an die Meßwerte der Probe 'Rote Dachziegel' als Funktion des Beobachtungszenitwinkels θ_r bei *like*-Polarisation. Die erste Spalte zeigt die Ergebnisse bei der Polarisationsorientierung ss , die zweite Spalte bei der Polarisationsorientierung pp . Die Plots innerhalb einer Spalte unterscheiden sich im Einfallswinkel. Dieser variiert zwischen $\theta_i = 30^\circ$ (oberer Plot) und $\theta_i = 65^\circ$ (unterer Plot) und ist in der jeweiligen Überschrift eines Einzelplots durch 'ti = xx grad' angegeben. Entsprechende Anpassungsergebnisse für die Probe 'Spectralon' sowie für die Probe 'Bestreute Dachpappe' zeigen die Abb. 5.4 bzw. Abb. 5.6. Die Anpassung der als Lambertsch angenommenen Anteile bei *cross*-Polarisation sp bzw. ps zeigen die Abbildungen 5.3, 5.5 und 5.7.

Die in allen Einzelplots erkennbaren Leerstellen in der Meßwertverteilung ist durch die Konstruktion des EGO begründet. Die räumliche Ausdehnung von Lichtquelle und Detektor verhindert eine Datennahme in direkter Rückstreurichtung ($\theta_i = \theta_r, \nu = 0^\circ$), es ist lediglich eine relative Annäherung auf etwa 10° möglich. Die zudem in den Messungen bei $\theta_i = 65^\circ$ auftretende, größere Leerstelle liegt am begrenzten Gesichtsfeld des Detektors (die ausgeleuchtete Probenfläche wird bei kleinen Beobachtungszenitwinkeln nicht vollständig durch den Detektor erfaßt).

⁵Für die Anpassung wurde auf die Funktion 'nlinlsq' (nonlinear least squares) in der Entwicklungsumgebung PV-WAVE v5.00b der Fa. Visual Numerics, Inc., Houston, Texas, <http://www.vni.com>, zurückgegriffen. Diese verwendet einen modifizierten Levenberg-Marquardt Algorithmus mit skaliertem Gradienten.

Probe	Pol.	a_0 $\frac{1}{\text{sr}}$	a_1 $\frac{1}{\text{sr}}$	a_2 $\frac{1}{\text{degree}}$	n	k	M / d_f
Spectralon	<i>ss</i>	0.0670 ± 0.0007	0.058 ± 0.006	0.040 ± 0.002	0.56 ± 0.11	0.63 ± 0.18	2,8
	<i>pp</i>	0.0898 ± 0.0010	0.058 ± 0.010	0.040 ± 0.004	0.56 ± 0.07	0.63 ± 0.07	0,9
	<i>sp</i>	0.0835 ± 0.0004	-	-	-	-	2,7
	<i>ps</i>	0.0646 ± 0.0004	-	-	-	-	2,3
Rote Dachziegel	<i>ss</i>	0.0397 ± 0.0004	0.250 ± 0.036	0.041 ± 0.001	1.45 ± 0.42	0.51 ± 0.28	3,4
	<i>pp</i>	0.0516 ± 0.0007	0.250 ± 0.024	0.041 ± 0.002	1.45 ± 0.02	0.51 ± 0.04	2,6
	<i>sp</i>	0.0379 ± 0.0002	-	-	-	-	1,8
	<i>ps</i>	0.0294 ± 0.0002	-	-	-	-	2,3
Bestreute Dachpappe	<i>ss</i>	$0.0077^* \pm 0.0006$	$0.035^* \pm 0.002$	$3\text{e-}07^* \pm 36.34$	$0.92^* \pm 0.11$	$0.64^* \pm 0.08$	7,4
	<i>pp</i>	$0.0086^* \pm 0.0004$	$0.035^* \pm 0.002$	$3\text{e-}07^* \pm 42.38$	$0.92^* \pm 0.02$	$0.64^* \pm 0.04$	7,4
	<i>sp</i>	$0.0085^* \pm 4.6\text{e-}05$	-	-	-	-	39,6
	<i>ps</i>	$0.0058^* \pm 2.9\text{e-}05$	-	-	-	-	39,4

Tabelle 5.1: Parameter aus der Anpassung des Modells von Torrance & Sparrow an die Meßdaten der verschiedenen Proben. Die Fehlerangaben beziehen sich auf die Unsicherheiten bei der Beschreibung der Meßwerte der jeweiligen Polarisationsorientierung *ss* oder *pp* und fallen daher, trotz gleicher Parameter, unterschiedlich aus (die Beschreibung durch das Modell ist mit den gegebenen Parametern unterschiedlich gut). Die Parameter der diffusen Komponenten a_0^{sp} und a_0^{ps} wurden getrennt angepaßt (lambertsch angenommen). Die letzte Spalte gibt die Testgröße M (vgl. Gl. 5.1) pro Freiheitsgrad d_f an.

Beachte: Die Annahme, daß die Normalen der Oberflächenelemente einer Gaußverteilung um den Erwartungswert Null folgen, wurde hier auch für die Probe 'Bestreute Dachpappe' angenommen. Die erhaltenen Parameter sind aus diesem Grunde mit einem * gekennzeichnet, näheres zum Sinn bzw. der Richtigkeit dieser Annahme siehe Text.

Generell liefert das Modell mit den in Tab. 5.1 bestimmten Parametern eine gute Beschreibung des Streuverhaltens der einzelnen Proben. Zum einen gibt es das starke Spiegelungsverhalten bei *ss*-Polarisation ebenso wieder, wie die deutlich geringere Spiegelung bei *pp*-Polarisation. Zum anderen steht es im Einklang mit der festgestellten Verschiebung des Spiegelungspeaks hin zu größeren Zenitwinkeln (im Allgemeinen würde man für eine spiegelnd reflektierende Oberfläche einen Spiegelungspeak bei $\theta_i = \theta_r$ erwarten). Hervorzuheben ist auch, daß das Modell einen Anstieg der Spiegelung mit zunehmenden Einfallswinkel abdeckt. Insbesondere die bei der Probe 'Rote Dachziegel' mit größer werdendem Einfallswinkel zunehmenden Unterschiede zwischen der Streuung in Vorwärtsrichtung (bei $+70^\circ$) zu der in Nadir ($\theta_r = 0^\circ$) bzw. Rückwärtsrichtung ($\theta_r = -70^\circ$) werden durch das Modell beschrieben. Dieses Resultat wird nochmals in Abbildung 5.8 verdeutlicht, welche eine zusammengefaßte Darstellung der für die Proben 'Spectralon' und 'Rote Dachziegel' in den einzelnen Abbildungen (5.2, 5.3, 5.4 und 5.5) gezeigten Ergebnisse darstellt. Man beachte, daß diese Zunahme für die Polarisationsorientierungen *ss* und *pp* unterschiedlich ausfällt.

Abweichungen des Modells von den Meßwerten lassen sich insbesondere bei der Beschreibung der Probe 'Bestreute Dachpappe' feststellen (siehe Abb. 5.6). Deren Reflexionsverhalten zeigt zum einen einen Anstieg der Streuung in Vorwärtsrichtung, welcher durch das Modell gut wiedergegeben wird. Zum anderen zeigt die Probe einen ausgeprägten Anstieg der Streuung in Rückwärtsrichtung. Dieser wird durch das Modell nur unzureichend beschrieben. Die Ursache für diese mangelnde Beschreibung des Streuverhaltens kann in zwei für die Probe unzureichenden Annahmen gesehen werden:

1. Die Probe setzt sich aus zwei verschiedenen Materialien zusammen, nämlich der Bitumenbahn und den auf diese aufgetragenen Sand / Quarz. Aufgrund dieser Probenstruktur ist ein Anstieg der BRDF mit zunehmendem Beobachtungswinkel vorstellbar (siehe hierzu Kap. 4.1.2), welcher nicht durch das Modell abgedeckt wird.
2. Die aufgetragenen Sandkörner bewirken, daß die Annahme über die Verteilung der Oberflächennormalen ('gaußverteilt um den Erwartungswert Null') nicht haltbar ist. Ein Großteil der Oberflächenelemente eines z.T. in das Bitumen hineinragende Sandkorns wird vielmehr extreme Neigungen besitzen und zur Folge haben, daß eine kompliziertere Verteilung für die Oberflächennormalen resultiert (möglicherweise die Summe mehrerer Gaußverteilungen mit verschiedenen Erwartungswerten).

Für die Probe 'Bestreute Dachpappe' zeigt sich, daß die Modellannahmen es nicht in jedem Fall zulassen, einen geeigneten Parametersatz zur vollständigen Beschreibung einer Probe zu bestimmen. Nicht desto trotz sind die erhaltenen Anpassungsergebnisse für *ss*- und *pp*-Polarisation in deutlich besserer Übereinstimmung zu den Meßwerten als die Lambertsche Annahme.

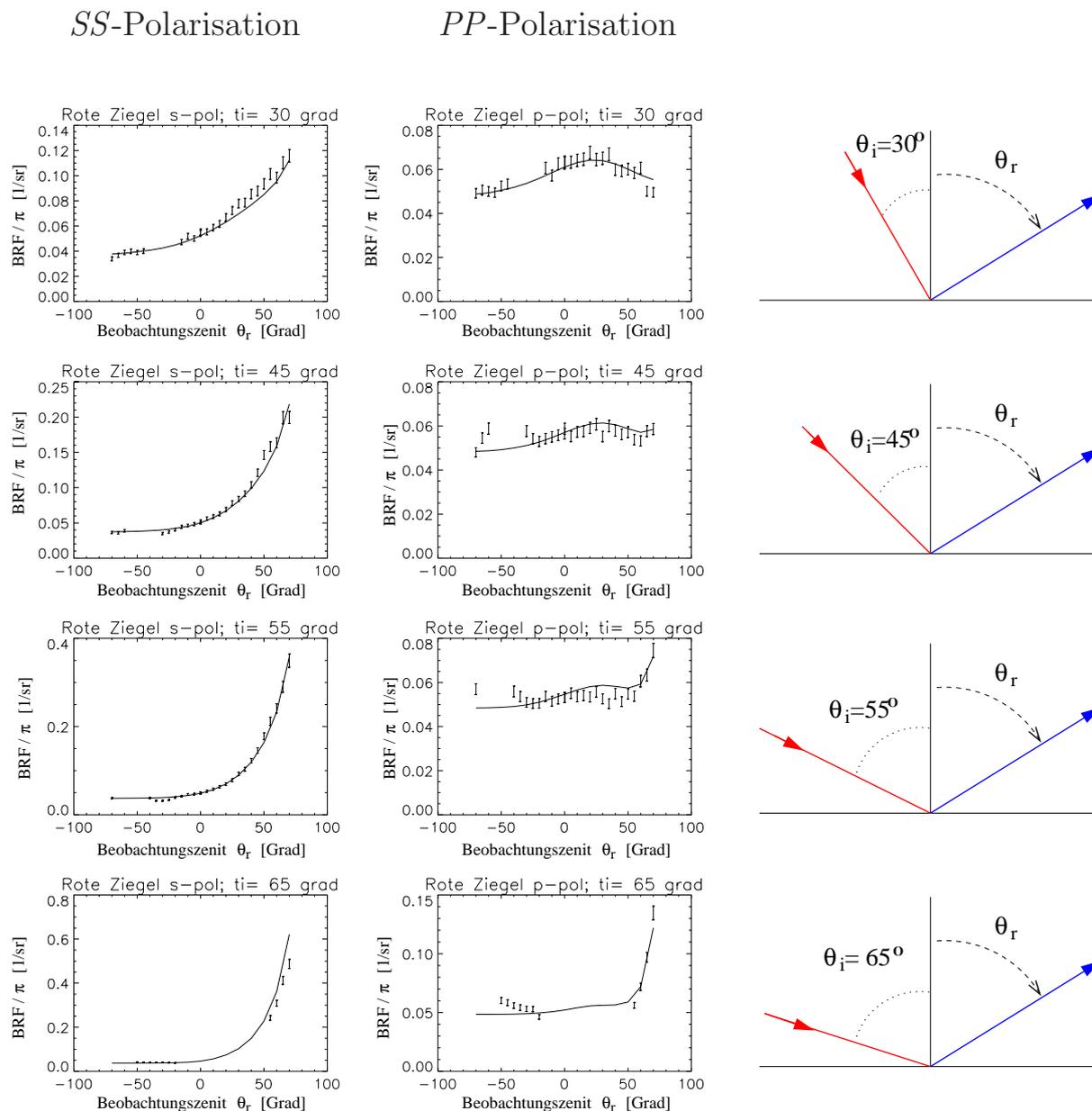


Abbildung 5.2: Anpassungsergebnis des Modells von Torrance & Sparrow bei *like*-Polarisation (durchgezogene Linie) an die Meßwerte der Probe 'Rote Dachziegel' (dargestellt durch Fehlerbalken). Bei positiven θ_r beobachtet man gegen die Lichtquelle (Vorwärtsstreuung, wie in der Illustration angedeutet), bei negativen θ_r beobachtet man die Probe mit der Lichtquelle im Rücken (Rückwärtsstreuung). In der linken Spalte sind die Ergebnisse bei *ss*-Polarisation für verschiedene Einfallswinkel gezeigt, die mittlere Spalte zeigt die korrespondierenden Ergebnisse für *pp*-Polarisation. Die rechte Spalte dient der besseren Anschauung der Beleuchtungsgeometrie. Bei festem Einfallswinkel θ_i wurde der Beobachtungswinkel θ_r variiert. Man beachte die unterschiedlichen Ordinaten.

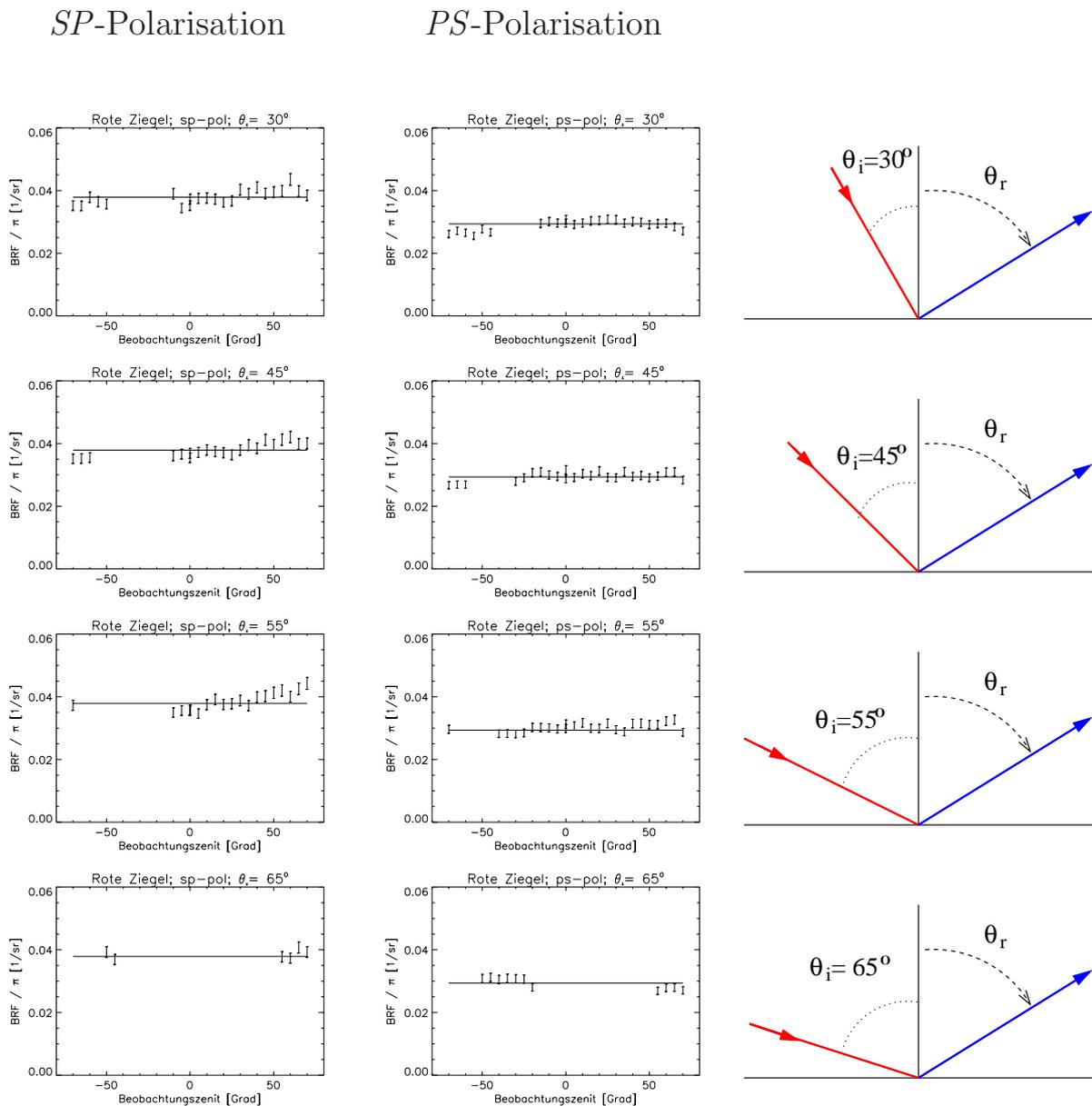


Abbildung 5.3: Anpassungsergebnis des Modells von Torrance & Sparrow bei *cross*-Polarisation (durchgezogene Linie) an die Meßwerte der Probe 'Rote Dachziegel' (dargestellt durch Fehlerbalken). Bei positiven θ_r beobachtet man gegen die Lichtquelle (Vorwärtsstreuung, wie in der Illustration angedeutet), bei negativen θ_r beobachtet man die Probe mit der Lichtquelle im Rücken (Rückwärtsstreuung). In der linken Spalte sind die Ergebnisse bei *sp*-Polarisation für verschiedene Einfallswinkel gezeigt, die mittlere Spalte zeigt die korrespondierenden Ergebnisse für *ps*-Polarisation. Die rechte Spalte dient der besseren Anschauung der Beleuchtungsgeometrie. Bei festem Einfallswinkel θ_i wurde der Beobachtungswinkel θ_r variiert.

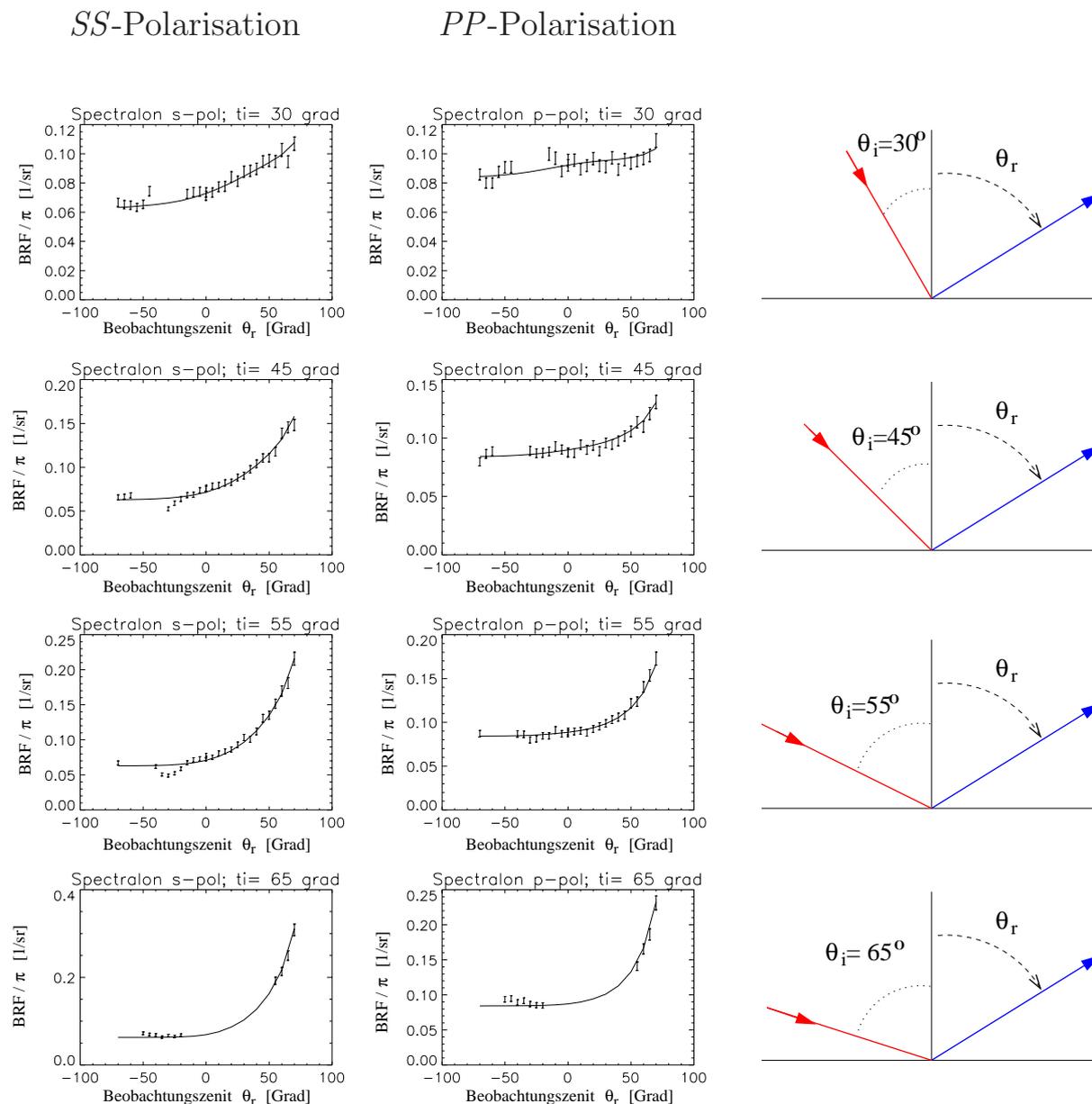


Abbildung 5.4: Anpassungsergebnis des Modells von Torrance & Sparrow bei *like*-Polarisation (durchgezogene Linie) an die Meßwerte der Probe 'Spectralon' (dargestellt durch Fehlerbalken). Bei positiven θ_r beobachtet man gegen die Lichtquelle (Vorwärtsstreuung, wie in der Illustration angedeutet), bei negativen θ_r beobachtet man die Probe mit der Lichtquelle im Rücken (Rückwärtsstreuung). In der linken Spalte sind die Ergebnisse bei *ss*-Polarisation für verschiedene Einfallswinkel gezeigt, die mittlere Spalte zeigt die korrespondierenden Ergebnisse für *pp*-Polarisation. Die rechte Spalte dient der besseren Anschauung der Beleuchtungsgeometrie. Bei festem Einfallswinkel θ_i wurde der Beobachtungswinkel θ_r variiert. Man beachte die unterschiedlichen Ordinaten.

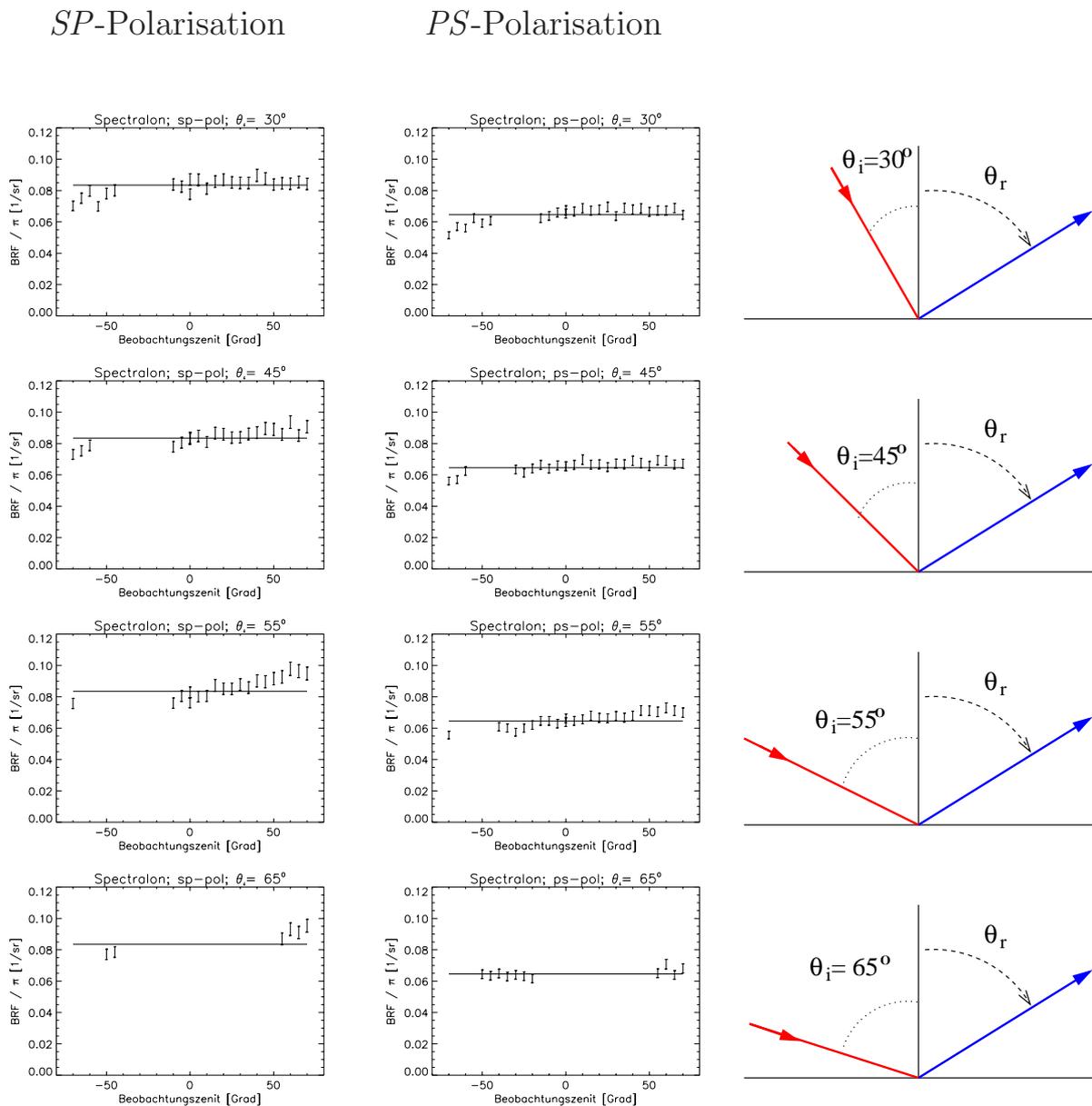


Abbildung 5.5: Anpassungsergebnis des Modells von Torrance & Sparrow bei *cross*-Polarisation (durchgezogene Linie) an die Meßwerte der Probe 'Spectralon' (dargestellt durch Fehlerbalken). Bei positivem θ_r beobachtet man gegen die Lichtquelle (Vorwärtsstreuung, wie in der Illustration angedeutet), bei negativen θ_r beobachtet man die Probe mit der Lichtquelle im Rücken (Rückwärtsstreuung). In der linken Spalte sind die Ergebnisse bei *sp*-Polarisation für verschiedene Einfallswinkel gezeigt, die mittlere Spalte zeigt die korrespondierenden Ergebnisse für *ps*-Polarisation. Die rechte Spalte dient der besseren Anschauung der Beleuchtungsgeometrie. Bei festem Einfallswinkel θ_i wurde der Beobachtungswinkel θ_r variiert.

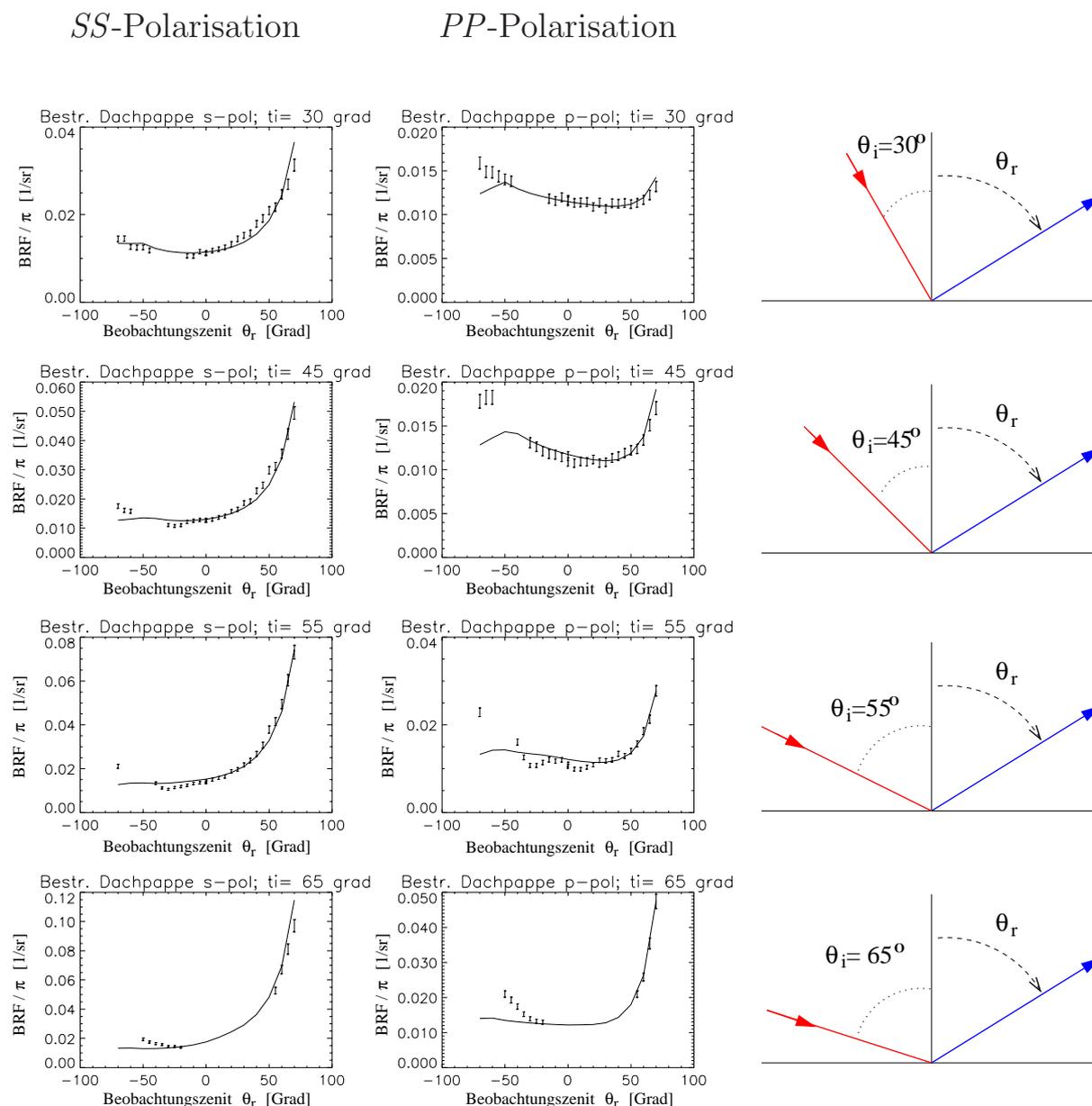


Abbildung 5.6: Anpassungsergebnis des Modells von Torrance & Sparrow bei *like*-Polarisation (durchgezogene Linie) an die Meßwerte der Probe 'Bestreute Dachpappe' (dargestellt durch Fehlerbalken). Bei positivem θ_r beobachtet man gegen die Lichtquelle (Vorwärtsstreuung, wie in der Illustration angedeutet), bei negativen θ_r beobachtet man die Probe mit der Lichtquelle im Rücken (Rückwärtsstreuung). In der linken Spalte sind die Ergebnisse bei *ss*-Polarisation für verschiedene Einfallswinkel gezeigt, die mittlere Spalte zeigt die korrespondierenden Ergebnisse für *pp*-Polarisation. Die rechte Spalte dient der besseren Anschauung der Beleuchtungsgeometrie. Bei festem Einfallswinkel θ_i wurde der Beobachtungswinkel θ_r variiert. Als Verteilung der V-förmigen Vertiefungen wurde eine Gaußverteilung mit Erwartungswert Null angenommen. Man beachte die unterschiedlichen Ordinaten.

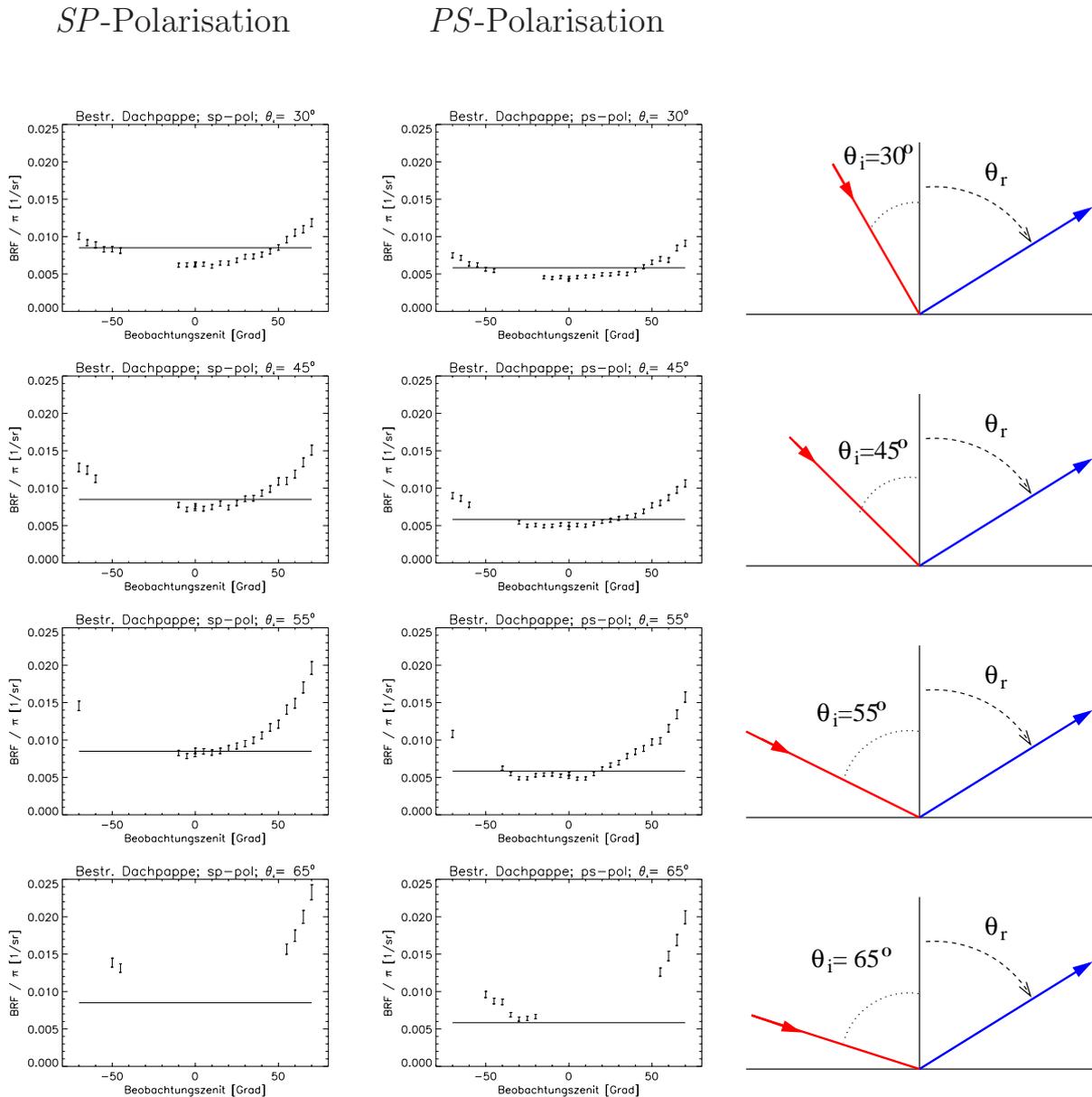


Abbildung 5.7: Anpassungsergebnis des Modells von Torrance & Sparrow bei *cross*-Polarisation (durchgezogene Linie) an die Meßwerte der Probe 'Bestreute Dachpappe' (dargestellt durch Fehlerbalken). Bei positivem θ_r beobachtet man gegen die Lichtquelle (Vorwärtsstreuung, wie in der Illustration angedeutet), bei negativen θ_r beobachtet man die Probe mit der Lichtquelle im Rücken (Rückwärtsstreuung). In der linken Spalte sind die Ergebnisse bei *sp*-Polarisation für verschiedene Einfallswinkel gezeigt, die mittlere Spalte zeigt die korrespondierenden Ergebnisse für *ps*-Polarisation. Die rechte Spalte dient der besseren Anschauung der Beleuchtungsgeometrie. Bei festem Einfallswinkel θ_i wurde der Beobachtungswinkel θ_r variiert.

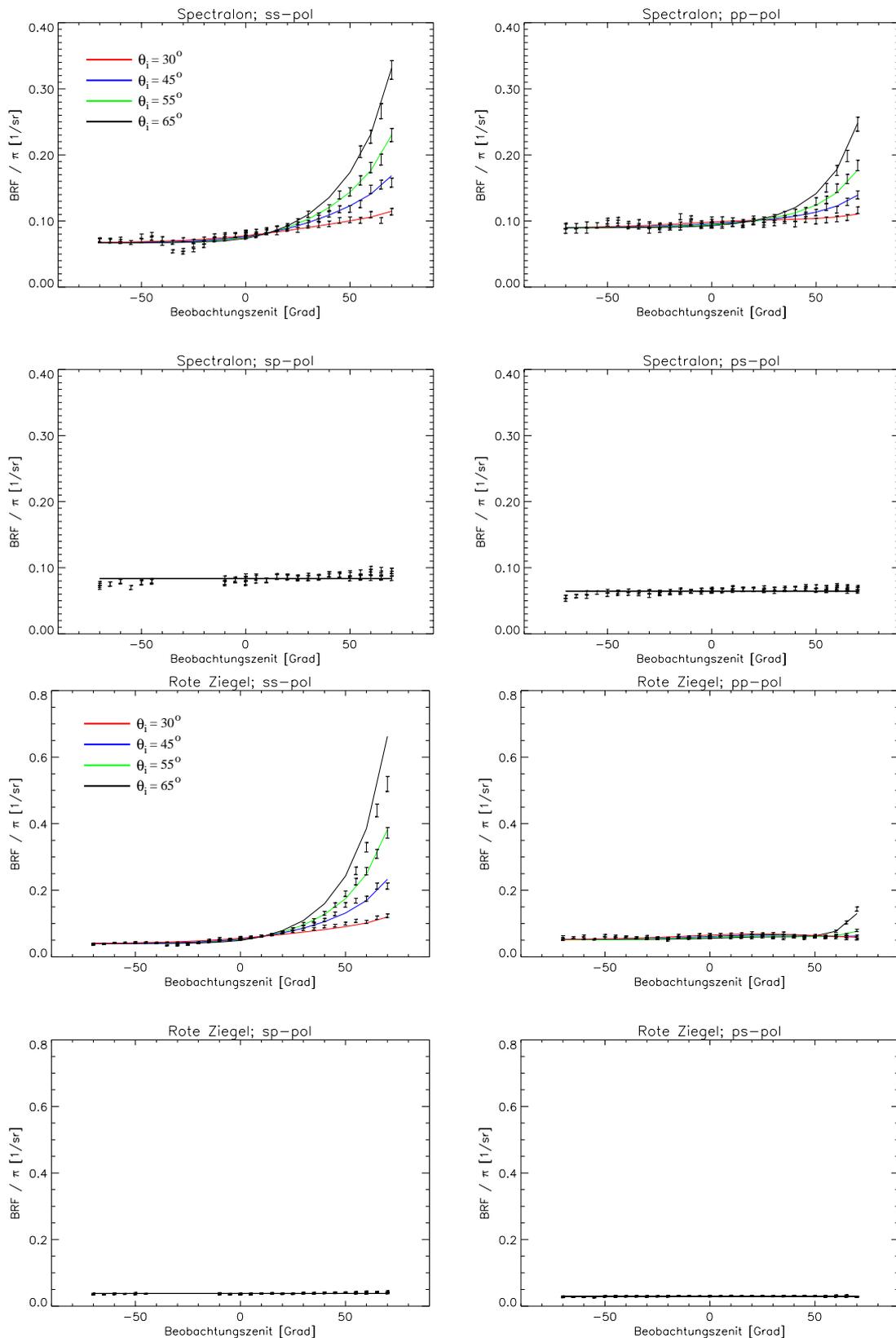


Abbildung 5.8: Kombinierte Darstellung der in den Abbildungen 5.2, 5.3, 5.4 und 5.5 gezeigten Ergebnisse. Man beachte die unterschiedlichen Ordinaten.

Geringere Abweichungen des Modells von den Meßwerten zeigen sich ebenfalls bei den anderen Proben. Es ist ein Anstieg in Rückstreurichtung zu erkennen, wenn sich der Beobachtungswinkel θ_r dem Einfallswinkel θ_i annähert (in den Plots zu erkennen als ein Anstieg in Richtung der durch die EGO Konstruktion bedingten Leerstellen). Dabei scheint es sich im Gegensatz zu dem kontinuierlichen Anstieg mit zunehmenden Beobachtungszenit wie bei der Probe 'Bestreute Dachpappe' eher um ein lokales Maximum in Rückstreurichtung zu handeln (z.B. erkennbar in den Meßwerten der Probe 'Rote Dachziegel' bei *pp*-Polarisation). Als Erklärung denkbar wären Fehler in der Bestimmung von Abschattungen und Verdeckungen. Dem widerspricht allerdings in gewissem Maße, daß keine großen Unterschiede für die verschiedenen Einfallswinkel festzustellen sind. Mit zunehmendem Einfallswinkel wird der Anteil an Abschattungen zunehmend größer und entsprechend erwarten wir eher größer werdende Abweichungen mit größer werdendem Einfallswinkel.

Anmerkung zur Beschreibung der Probe 'Bestreute Dachpappe'

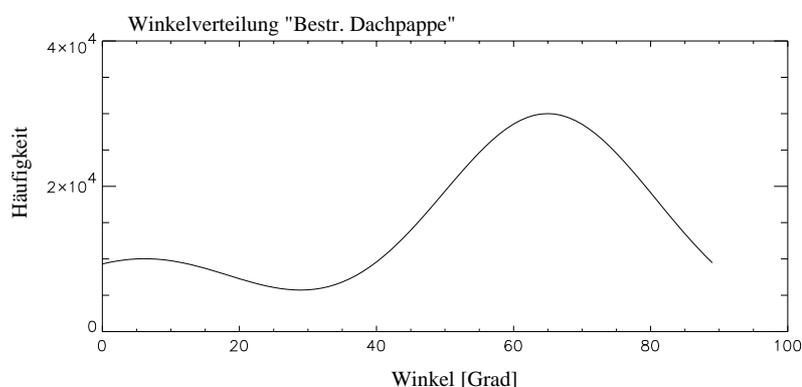
Die Probenzusammensetzung und das spezielle Reflexionsverhalten der Probe 'Bestreute Dachpappe' zeigen, daß Änderungen in den Annahmen über diese Probe für eine bessere Modellbeschreibung nötig sind. Aufgrund fehlender detaillierter Kenntnisse über die Probe (z.B. Höhe und Neigung des Quarz oder die Anteile von Bitumen und Quarz) liegt der Ansatz nahe, den mit zunehmenden Beobachtungswinkel gemessenen Anstieg der Reflexion durch eine Abhängigkeit der diffusen Komponente vom Beobachtungszenitwinkel zu beschreiben (eine Zunahme / Abnahme der BRDF mit zunehmendem Beobachtungszenit findet sich z.B. in [WNW⁺85]). Bestimmt man eine relative Zunahme der Reflexion anhand der Meßergebnisse bei Kreuzpolarisation und rechnet diese Zunahme der diffusen Komponente aus den Messungen bei *like*-Polarisation heraus, so resultiert daraus für kleine Einfallswinkel θ_i jedoch ein Abfall der BRDF ($\theta_i = 30^\circ$, *pp*-Pol.). Dies würde einen mit zunehmenden Beobachtungszenit kleiner werdenden Beitrag des Spiegelungsanteils zur Folge haben, welcher vom Modell so nicht geleistet werden kann. Bei genauerer Betrachtung des Streuverhaltens bei *cross*-Polarisation ist erkennbar, daß mit zunehmendem Einfallswinkel θ_i das Verhältnis der Streuung bei großen ($\theta_r \rightarrow \pm 70^\circ$) zu kleinen Beobachtungswinkeln ($\theta_r \rightarrow 0^\circ$) größer wird. Ebenfalls werden die Unterschiede zwischen der Streuung in Vorwärtsrichtung ($\theta_r = +70^\circ$) und der Streuung in Rückwärtsrichtung ($\theta_r = -70^\circ$) mit zunehmendem Einfallswinkel θ_i größer, d.h. das Streuverhalten entlang der Hauptebene wird bei *cross*-Polarisation zunehmend unsymmetrischer. Unterschiede im Streuverhalten zwischen den Polarisationsrichtungen *s* und *p* der einfallenden Strahlung sind in der absoluten Stärke feststellbar. Die Streuung ist bei *sp*-Polarisation stärker als bei *ps*-Polarisation. Die relative Zunahme der Streuung in Vorwärtsstreurichtung ist in beiden Fällen ähnlich.

Das gezeigte Streuverhalten ist nicht allein durch die Beleuchtung bzw. Beobachtung verschiedener Anteile von Quarz bzw. Bitumen erklärbar. Es muß weitere Effekte geben, welche auch mit Änderungen der Polarisationsrichtung einhergehen. Plausible Ursachen können z.B. zweifach spiegelnde Reflexionen an Quarz sein, welche Änderungen in der Polarisationsrichtung zur Folge haben. Auch denkbar ist, daß Teile der Strahlung in den Quarz eindringen. Diese könnten an tieferen Schichten wieder aus dem Quarz herausgestreut

werden oder durch diesen transmittieren und an einem weiteren Quarz reflektiert werden. Ebenfalls zu beachten ist, daß Quarz ein einachsiges, doppelbrechendes Material ist. Es gehört zu den optisch aktiven Substanzen, d.h. die Orientierung der Polarisationssebene von einer linear polarisierten Welle ändert sich proportional zur Länge, welche das Licht in der Substanz zurücklegt.

Neben der Annahme einer Gaußverteilung für die Neigung der V-förmigen Vertiefungen erlaubt das Modell auch die Verwendung anderer Verteilungen. Durch die Wahl einer von einer Gaußverteilung abweichenden Neigungsverteilung läßt sich die Beschreibung des Reflexionsverhaltens der Probe bei *like*-Polarisation zu dem in Abb. 5.10 gezeigten Ergebnis verbessern. Die dabei verwendete Neigungsverteilung wurde aus zwei Gaußverteilungen zusammengesetzt und ist in Abb. 5.9 gezeigt.

Abbildung 5.9: Gewählte Verteilung der V-Förmigen Vertiefungen zur Beschreibung der Probe 'Bestreute Dachpappe' im Modell von Torrance & Sparrow.



Ungeachtet der Probenzusammensetzung (dunkler Bitumen / heller Quarz) erhält man durch die in Abb. 5.9 gewählte Verteilungsfunktion der Neigungen das in Abb. 5.10 gezeigte Modellergebnis. Dieses zeigt im Gegensatz zu Abb. 5.6 eine verbesserte Beschreibung der erhöhten Streuung in Rückstreurichtung. Die Erwartungswerte der Verteilungen wurden zu 6° bzw. 65° bestimmt. Das von der Probe gezeigte Streuverhalten ist dadurch im Sinne des Modells anschaulich aus einfach spiegelnder Reflexion an zwei verschiedenen Rauigkeiten zusammengesetzt. Viele stark geneigte Oberflächenelemente (sehr rauhe Oberfläche) tragen zu einer erhöhten Streuung in Rückstreurichtung bei, während eine Häufung von weniger stark geneigte Oberflächenelementen eine eher glatte Oberfläche repräsentieren und zu dem Anstieg in Vorwärtsstreurichtung beitragen⁶. Im Hinblick auf das insgesamt von der Probe gezeigte Streuverhalten wird dadurch allerdings nur die Beschreibung der *like*-Polarisation abgedeckt. Aussagen über das Reflexionsverhalten bei *cross*-Polarisation werden hierdurch nicht geliefert.

Im Bezug auf die Anpassungsparameter ist festzuhalten, daß aus der Anpassung des Modells von Torrance & Sparrow an die Meßwerte der behandelten Proben jeweils ein *komplexer Brechungsindex zur Beschreibung der Reflexion nötig* ist. Dieser Umstand ist aus

⁶In erster Näherung kann wahrscheinlich davon ausgegangen werden, daß die Streuung am dunklen Bitumen gegenüber der am Quarz vernachlässigbar ist. Die Verteilungen stellen dann weniger eine Analogie zu den beiden Oberflächenmaterialien her, sondern vielmehr eine zu der Spiegelung/Streuung in verschiedenen Materialtiefen.

Messungen ohne getrennte Betrachtung der einzelnen Polarisationsorientierungen (z.B. bei Messungen mit unpolarisiertem Licht) nicht ersichtlich [Mei00], da die sehr ausgeprägten Reflexionseffekte bei *ss*-Polarisation (vgl. z.B. Abb.5.2) die zumeist schwächeren winkelabhängigen Änderungen bei *pp*-Polarisation überdecken. Die bei derartigen Messungen zusätzlich enthaltenen Anteile der Kreuzpolarisation verringern zudem die relativen Unterschiede zwischen den gemessenen BRF-Werten und können diese weniger signifikant erscheinen lassen (die Unsicherheit wird größer, wenn nicht-additive Fehler in die Messung eingehen). Eine Variation der Größen n , k des komplexen Brechungsindex kann dadurch bei der Modellanpassung an Meßwerte, welche durch Messungen mit unpolarisiertem Licht bestimmt wurden, durch den Parameter der Spiegelungsintensität (a_1 in Gl. 5.2) kompensiert werden (siehe auch S. 79 / 80 in [Mei00]).

Gehaltvolle Werte für den Brechungsindex abzuschätzen gestaltet sich schwierig, weshalb z.B. [ON95] die Fresnelreflektanz gleich 1 setzen. Vielfach wird auch auf einen reellen Brechungsindex zurückgegriffen, so wird z.B. in [GSK98] $k = 0$ gesetzt. [Wol96] verwenden in ihren Untersuchungen ein Dielektrikum mit reellem Brechungsindex, in z.B. [Sto95] oder [Hap93] wird auf einen mittleren Brechungsindex von 1,5 zurückgegriffen.

Für die hier vorliegenden Messungen ist eine Reduktion des Brechungsindex auf eine reelle Größe nicht möglich. Die Anpassung des Modells unter Verwendung eines lediglich reellen Brechungsindex führt zu einer Verschlechterung der Beschreibung der Meßwerte durch das Modell, wie Abb. 5.11 exemplarisch für die Probe Spectralon illustriert. Insbesondere bei *pp*-Polarisation kommt es zu einer Unterschätzung des in Vorwärtsrichtung gemessenen Anstiegs der Reflexion. Ein ähnliches Resultat der Modellbeschreibung zeigt sich ebenfalls für die Probe 'Rote Dachziegel'. Die Abweichungen sind für diese weniger stark ausgeprägt, und ist auf die deutlicheren Unterschiede in der Reflexion zwischen *ss*- und *pp*-Polarisation zurückzuführen (eine Änderung in den geringen absoluten Größen bei *pp*-Polarisation fällt gegenüber den starken Änderungen bei *ss*-Polarisation nicht mehr ins Gewicht).

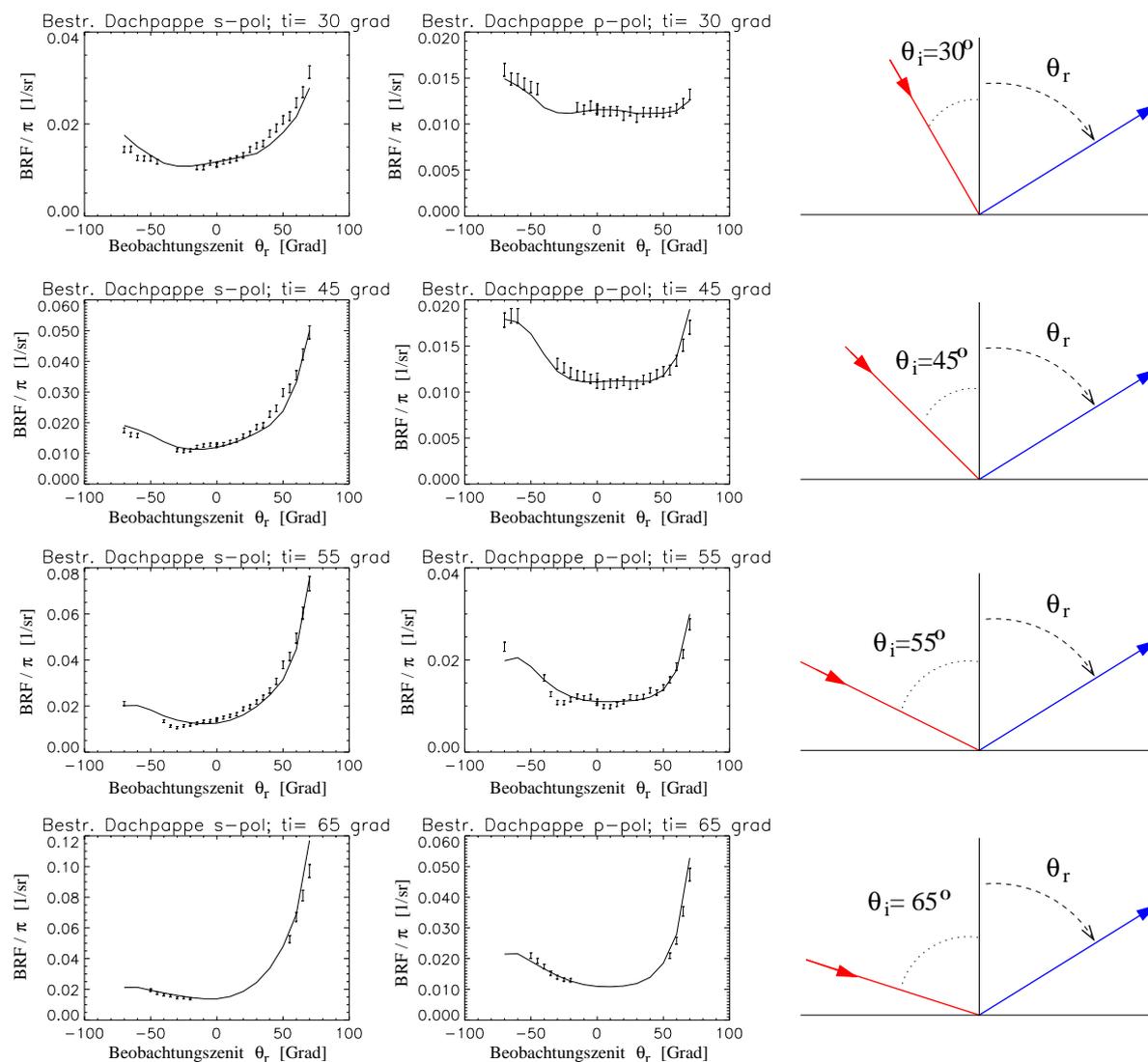


Abbildung 5.10: Anpassungsergebnis des Modells von Torrance & Sparrow bei *like*-Polarisation (durchgezogene Linie) an die Meßwerte der Probe 'Bestreute Dachpappe' (dargestellt durch Fehlerbalken). Bei positivem θ_r beobachtet man gegen die Lichtquelle (Vorwärtsstreuung, wie in der Illustration angedeutet), bei negativen θ_r beobachtet man die Probe mit der Lichtquelle im Rücken (Rückwärtsstreuung). In der linken Spalte sind die Ergebnisse bei *ss*-Polarisation für verschiedene Einfallszenitwinkel gezeigt, die mittlere Spalte zeigt die korrespondierenden Ergebnisse für *pp*-Polarisation. Die rechte Spalte dient der besseren Anschauung der Beleuchtungsgeometrie. Bei festem Einfallszenit θ_i wurde der Beobachtungswinkel θ_r variiert. Als Verteilung der V-förmigen Vertiefungen wurde die in Abb. 5.9 dargestellte Verteilung gewählt. Man beachte die unterschiedlichen Ordinaten.

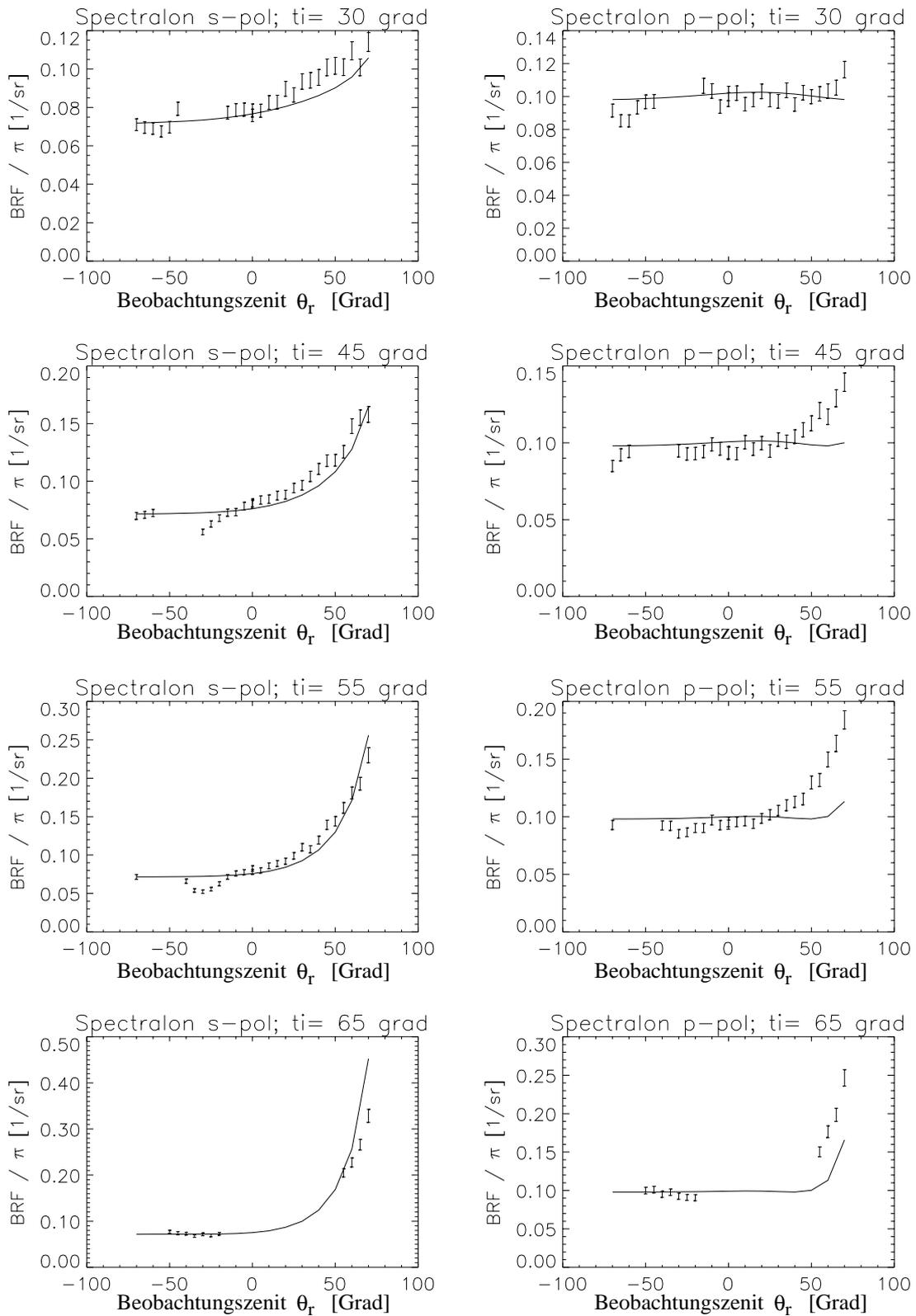


Abbildung 5.11: Anpassungsergebnis bei Verwendung eines reellen Brechungsindex zur Beschreibung der Probe 'Spectralon' im Modell von Torrance & Sparrow. Man beachte die unterschiedlichen Ordinaten.

5.3.1 Messungen außerhalb der Hauptebene

Neben den Messungen in der Hauptebene wurden auch Messungen an ausgewählten Winkelpositionen außerhalb dieser durchgeführt. Die Messungen erfolgten für die Polarisationsrichtungen s und p , auf den Polarisationsfilter (am Detektor) wurde aus Zeitgründen verzichtet. Als Einfallswinkel wurden $\theta_i = 30^\circ, 50^\circ$ gewählt, die gewählten Relativazimutwinkel liegen in einem Winkelbereich zwischen 0° (Rückstreurichtung) und 210° (180° korrespondiert zur Vorwärtsstreurichtung in der Hauptebene). Die Verteilung der Winkelstützstellen wurden dabei so gewählt, daß für Bereiche mit starken erwarteten Änderungen des Reflexionsverhalten (Vorwärts- und Rückstreurichtung) eine kleinere Winkelschrittweite verwendet wurde als für Winkelbereiche senkrecht zur Hauptebene (eine Illustration der gemessenen Winkelabdeckung ist im Anhang A.6.2 zu finden). Die aus diesen Messungen bestimmten Meßwerte sind zu einem Teil mit einem starken systematischen Fehler behaftet, welcher auf eine lokale, nicht-plane Orientierung des horizontalen Grundkreises des EGO Goniometers (siehe Abb. 4.1) zurückzuführen ist. Diese resultiert in einer Abhängigkeit der Lage des Gesichtsfeldes von der Beobachtungsposition, d.h. die Lage des Mittelpunktes des Detektor-Gesichtsfeldes auf der Probenoberfläche ändert sich z.B. bei einer Änderung des Azimutwinkels oder des Beobachtungswinkels⁷. Je nach Lampen und Detektorposition kann es dadurch dazu kommen, daß ein Teil der beleuchteten Probenfläche nicht vom Gesichtsfeld des Detektors erfaßt wird. Dies hat zur Folge, daß der schließlich berechnete BRDF-Wert unterschätzt wird. Aufgrund von Justierungsänderungen und fehlender Kontrollmessungen außerhalb der Hauptebene kann dieser systematische Fehler nicht aus den Meßdaten herauskorrigiert werden. Aus diesen Grunde wurde auf eine Modellanpassung an die Meßwerte verzichtet und es erfolgt lediglich eine Gegenüberstellung der Meßwerte mit den Ergebnissen der Modellanpassung aus Kap. 5.3. Dadurch, daß die Messungen ohne Polarisationsfilter durchgeführt wurden, ist für den Vergleich die Summe aus der zur einfallenden Polarisationsrichtung korrespondierenden *like*- und *cross*-Polarisationskomponente zu berechnen.

Abbildung 5.12 zeigt den Vergleich zwischen Meß- und Modellwerten, aufgetragen gegen die Reihenfolge, in der die einzelnen Messungen unter Zuhilfenahme des Steuerfiles (vgl. Anhang A.6) durchgeführt wurden. Man beachte, daß innerhalb eines Plots sowohl Einfallswinkel- als auch Relativazimut- und Beobachtungswinkel variieren. Aus dieser Gegenüberstellung von Modell und Meßwerten ist ersichtlich, daß die aus der Anpassung des Modells an die Messungen in der Hauptebene bestimmten Modellparameter auch die Beschreibung von Messungen außerhalb der Hauptebene ermöglichen. Abweichungen sind lediglich an den Winkelstellen zu finden, bei denen auch schon Abweichungen zwischen Modellbeschreibung und Meßwerten in der Hauptebene zu finden sind.

⁷Messungen vom 10. Sept. 1997 im Rahmen des Goniometerumbaus zeigten Positionsveränderungen innerhalb eines um den Ursprung gedachten Kreises mit einem Radius von etwa 2 cm, in Extremfällen bis zu einem Radius von etwa 3,5 cm.

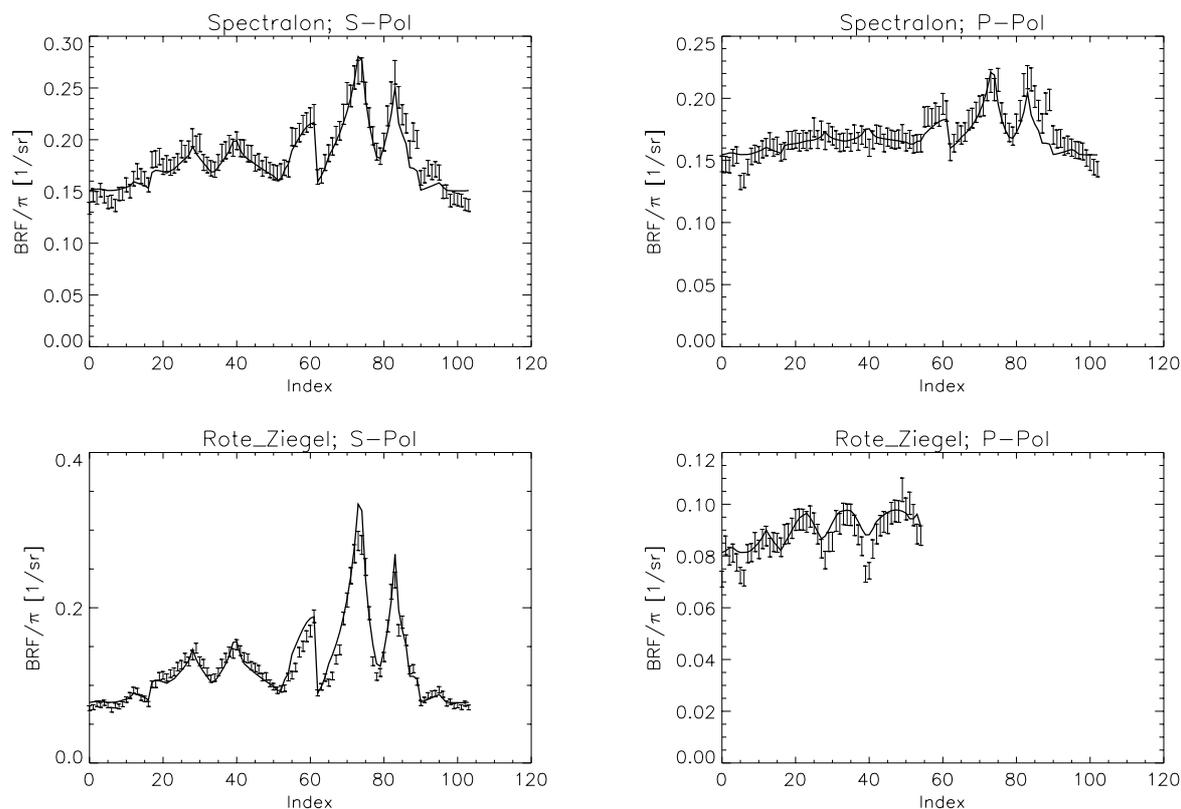


Abbildung 5.12: Gegenüberstellung von Modell und Meßergebnissen außerhalb der Hauptebene, aufgetragen gegen die Reihenfolge, in der die einzelnen Messungen unter Zuhilfenahme des Steuerfiles (vgl. Anhang A.6) durchgeführt wurden. Die Meßwerte sind durch Fehlerbalken dargestellt (siehe Text wegen nicht erfaßter systematischer Unsicherheiten), die korrespondierenden Modellwerte sind der Übersicht halber als verbundene Linie dargestellt. Die Modellparameter entstammen der Modellanpassung an separaten Messungen in der Hauptebene (Kap. 5.3). Probenbezeichnung und Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung finden sich in der Kopfzeile eines jeden Einzelplots. Man beachte, daß innerhalb eines Plots sowohl Einfallswinkel- als auch Relativazimut- und Beobachtungswinkel variieren. Auch bedeutet eine Übereinstimmung in der Nummer der Messungen nicht gleiche Winkelstellungen bei der Messung.

Die Abbildung 5.13 und 5.14 zeigen die Meß- und Modellwerte nochmals in Form von 3D-Plots. Diese geben einen Überblick über die Verteilung der Meßwerte über die obere Halbkugel sowie das korrespondierende Modellergebnis. Eine Beschreibung des Aufbaus der 3D-Plots ist in Abb. 3.31 gegeben.

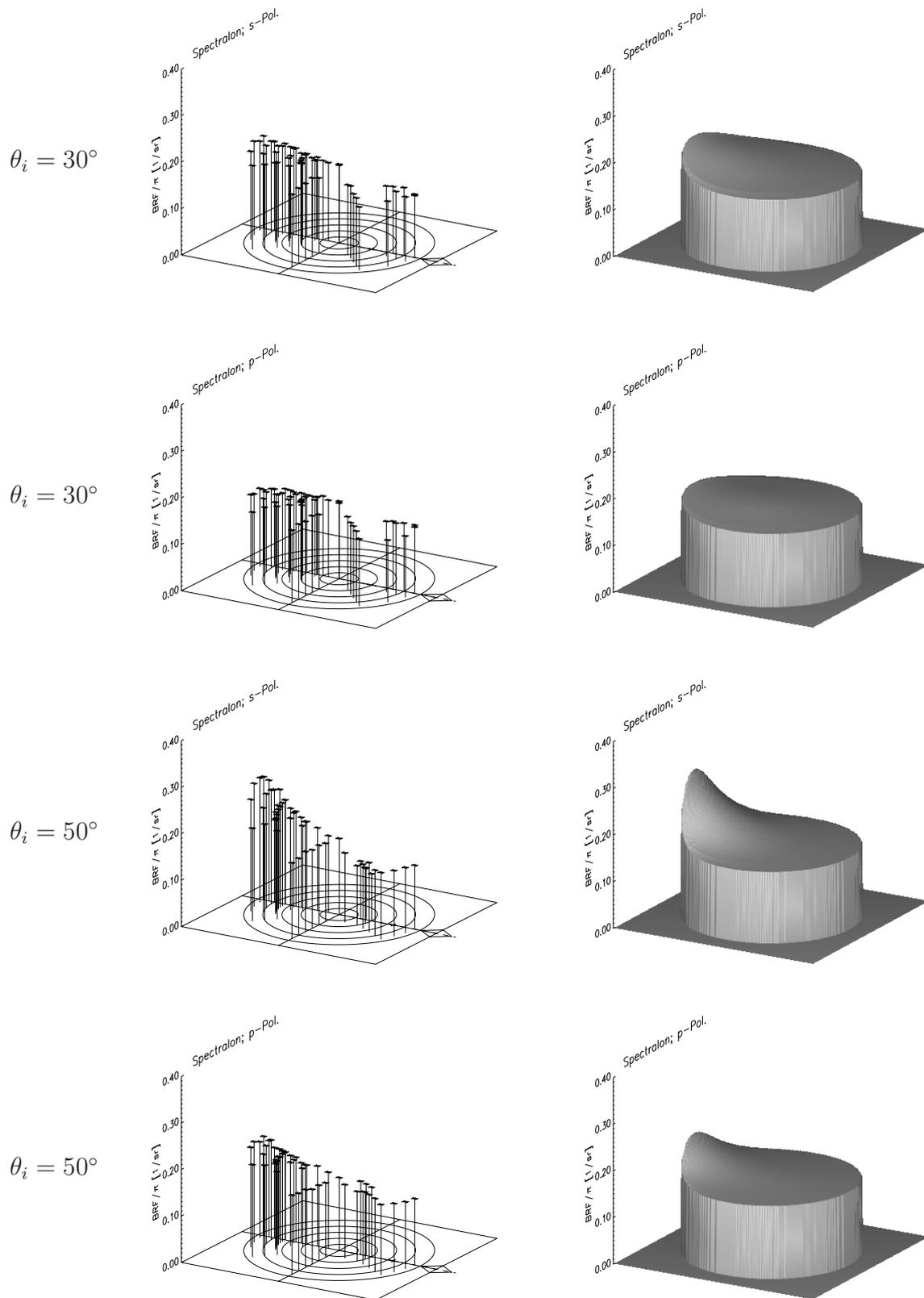


Abbildung 5.13: Illustration des Reflexionsverhalten von Spectralon außerhalb der Hauptebene. Die Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung ist in der Kopfzeile eines Einzelplots angegeben. Zum Aufbau der Abbildungen siehe Abb. 3.31.

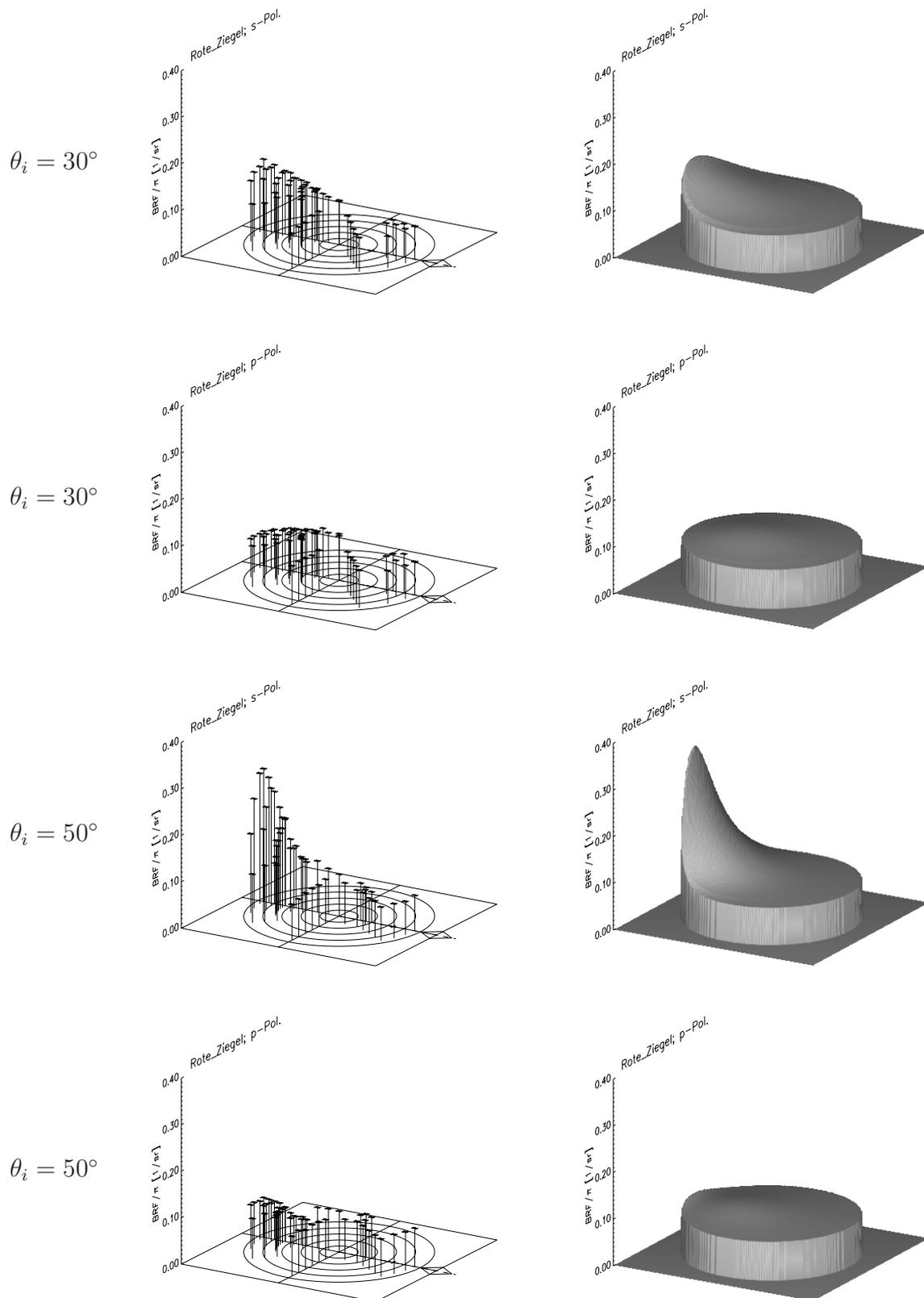


Abbildung 5.14: Illustration des Reflexionsverhalten der Probe 'Rote Dachziegel' außerhalb der Hauptebene. Die Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung ist in der Kopfzeile eines Einzelplots angegeben. Zum Aufbau der Abbildungen siehe Abb. 3.31.

5.4 Betrachtungen zur Albedo

Basierend auf dem Modell von Torrance & Sparrow lassen sich für die Proben die verschiedenen Anteile der Albedo ρ bestimmen. D.h. wir können das Verhältnis zwischen dem Strahlungsanteil bestimmen, welcher durch einfach spiegelnde Reflexion beschrieben werden kann und dem Anteil, welcher aufgrund von Mehrfachstreuungen durch die diffusen Komponenten beschrieben wird. Die Gesamtalbedo ρ_x für einfallendes Licht der Polarisationsrichtung x ist gegeben durch

$$\rho_x = a_{0xx} \cdot \pi + a_{0xy} \cdot \pi + \bar{I}_{xx}^{\text{spec}} \quad , \quad (5.5)$$

wenn y die korrespondierende Komponente der Kreuzpolarisation bezeichnet. $\bar{I}_{xx}^{\text{spec}}$ ist der Beitrag der spiegelnden Reflexion, gemittelt über die bei unseren Messungen verwendeten Einfallswinkel $\theta_i = 30^\circ, 45^\circ, 55^\circ$ und 65° . I_{xx}^{spec} als Funktion des Einfallswinkels ist gegeben durch das Integral des spiegelnden Anteils über den projizierten Beobachtungswinkel $d\omega_r = \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta d\nu$ über die gesamte obere Hemisphäre Ω_r :

$$I_{\text{spec}}^{xx}(\theta_i) = \int_{\Omega_r} a_1 \cdot \frac{F(\theta_i, \theta_r, \nu, \hat{n}) G(\theta_i, \theta_r, \nu)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \cdot e^{-a_2^2 \alpha^2} d\omega_r \quad . \quad (5.6)$$

Mit den Koeffizienten aus Tab. 5.1 ergibt sich für die Proben 'Spectralon' und 'Rote Dachziegel':

$$\begin{aligned} \rho_s^{\text{Spectralon}} &\approx (0.067 + 0.083) \cdot \pi + 0.045 = 0.517 \pm 0.011 \\ \rho_p^{\text{Spectralon}} &\approx (0.090 + 0.065) \cdot \pi + 0.023 = 0.510 \pm 0.008 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_s^{\text{Rote Dachziegel}} &\approx (0.040 + 0.038) \cdot \pi + 0.080 = 0.325 \pm 0.037 \\ \rho_p^{\text{Rote Dachziegel}} &\approx (0.052 + 0.029) \cdot \pi + 0.016 = 0.271 \pm 0.052 \end{aligned}$$

Der Unterschied in den Gesamtalbedos ist innerhalb der Fehler gleich, d.h. für beide Proben ist das gesamte Rückstrahlvermögen unabhängig von der Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung. Die zur Gesamtalbedo beitragenden Teilbeiträge unterscheiden sich allerdings in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung und verteilen sich im Sinne der Modellannahmen auf unterschiedlich starke Anteile von spiegelnder und diffuser Streuung. Die Beiträge der spiegelnden Albedo zur Gesamtalbedo $\Delta_x = \bar{I}_{xx}^{\text{spec}} / \rho_x$ betragen $\Delta_s \approx 8.7\%$ und $\Delta_p \approx 4.5\%$ für die Probe 'Spectralon', für die Probe 'Rote Dachziegel' ergeben sich Beiträge von $\Delta_s \approx 24,6\%$ und $\Delta_p \approx 5.9\%$. Eine akkurate Reproduktion der spiegelnden Komponente ist daher für die Probe 'Rote Dachziegel' wichtiger als für die Probe 'Spectralon'.

Erwähnt werden sollte außerdem, daß die für das Spectralon bestimmten Albedos im Rahmen der Genauigkeit mit der Albedoangabe des Herstellers aus Messungen mit unpolarisiertem Licht von $\rho_{\text{Fab}} = 0.511$ [Lab94] übereinstimmt. Aufgrund der zur Bestimmung

der einfallenden Strahlungsflußdichte verwendeten BRDF des Spectralons ist dieser Umstand mehr als Konsistenzbeweis zu werten⁸.

⁸Eine unabhängige Messung der einfallenden Strahlungsflußdichte war nicht möglich, da der Laser nicht direkt in den Sensor gerichtet werden sollte. Aufgrund nicht vorhandener Sensorkalibration auf absolute Werte konnte auch nicht auf andere Meßgeräte zurückgegriffen werden.

Der Vollständigkeit halber ist anzumerken, daß sich die einfallende Strahlungsflußdichte auch anhand der gemessenen Strahldichte an verschiedenen Winkelstützstellen der oberen Halbkugel sowie von Nährungswerten für fehlende Winkelstützstellen berechnen läßt. Eine eingehende Beschreibung findet sich z.B. in [Mei96]. Dieser Weg setzt ebenfalls die Kenntnis der Albedo voraus und ergibt für die vorliegenden Messungen zu Kap. 4.3.2 vergleichbare Werte der einfallenden Strahlungsflußdichte von $E = 33107$ Grauwerte. Die relativen Unsicherheiten liegen in diesem Fall bei etwa 6% und sind auf die geringe Anzahl bzw. die eingeschränkte Winkelverteilung der Stützstellen zurückzuführen. Zugunsten einer geringeren Unsicherheit wurde bei der Berechnung der einfallenden Strahlungsflußdichte auf die Kenntnis der BRDF des Spectralons zurückgegriffen.

6 Zur Berücksichtigung von BRDF-Effekten in der Verarbeitung von Luft- und Satellitenbildern

Die Berücksichtigung von BRDF-Effekten in der Verarbeitung von Luft- und Satellitenbildern findet sich bisher in Anwendungen mit großem räumlichen Maßstab. Diese stützen sich auf multiangulare Fernerkundungsdaten von AVHRR [JK94] oder POLDER [LDB⁺97], in Zukunft auch auf Daten der multiangularen Sensoren wie z.B. MISR/MODIS¹ [WSH⁺97, SLT⁺99] oder MERIS² [BG99]. Der Schwerpunkt verschiedener Anwendungen liegt in der Bestimmung der Albedo bei Pixelgrößen zwischen 0,3 und 8,0 km, welche für Aussagen über die globale Klima- und Vegetationsentwicklung herangezogen wird. Hintergrund dabei ist, daß räumliche und zeitliche Änderungen der Albedo in Zusammenhang mit verschiedenen natürlichen und durch den Menschen bedingten Einflüssen auf die Erde stehen (z.B. Agrarwirtschaft, Waldrodung, Urbanisierung, saisonale Vegetationsveränderungen oder die globale Verteilung von Schnee und Eis).

Für die Satellitendaten wurden den Auflösungen entsprechende globale Modelle entwickelt (siehe z.B. [SLHM98] für AVHRR-Daten). Sie zeigen, daß die Berücksichtigung der winkelabhängigen Reflexion zur verbesserten Bestimmung von Oberflächenparametern beitragen kann, indem diese z.B. an Atmosphärenmodelle gekoppelt werden [VSJ⁺97, Qiu01]. Dazu bedarf es dann der (Vor-)Kenntnis des beobachteten Oberflächenmaterials sowie dessen winkelabhängigen Reflexionsverhaltens. Auf globalem Maßstab bieten sich dazu räumlich ausgedehnte Gebiete wie z.B. Waldgebiete oder Wüsten an. Ein auf multiangulare Beobachtungen von Satelliten aufbauender Algorithmus zur Bestimmung der Albedo von Vegetation und Ödland findet sich in [LSS00]. Der Algorithmus nutzt sogenannte kernel-basierende BRDF-Modelle und dient zur systematischen Erstellung eines 1 km MODIS BRDF/Albedo Datenproduktes. Für die Bestimmung der Albedo von städtischen Gebieten bei Bildpunkten auf der 1 km-Skala kann auf [MRSB01] zurückgegriffen werden.

Neben den globalen Erdbeobachtungssatelliten mit großflächigen Bodenpixeln sind z.B. durch den IKONOS-2-Satelliten auch hochaufgelöste Satellitenbilder im Meterbe-

¹Der beide Sensoren tragende Terra-Satellit wurde erfolgreich am 18. Dezember 1999 gestartet. (Test-)Daten sind seit dem 24. Feb. 2000 verfügbar, erste Produktdatensätze sind seit dem 27. Apr. 2001 zugänglich (MODIS).

²Das MEedium Resolution Imaging Specrometer Instrument (MERIS) ist Bestandteil des Envisat-Satelliten, welcher im Jahr 2002 vom Europäischen Weltraumbahnhof in Kourou, Franz. Guyana gestartet werden soll.

reich (1–4 m Pixel) verfügbar. Durch diesen bietet sich die Möglichkeit räumlich feinere Strukturen wie z.B. einzelne Straßen oder Häuser aufzulösen. Anhand der Bilder kann eine Bewertung von regionalen Bodenbedeckungen / Einflüssen erfolgen (einzelne bauliche Veränderungen in Städten; Informationen zur Untersuchung des Stadtklimas o.ä.). Der IKONOS-2 Satellit ist zudem in der Lage, den Sensor parallel oder senkrecht zu seiner Bahnebene zu schwenken. Die dadurch gewonnenen Stereoaufnahmen sollen zur Erstellung von mittel- bis großskaligen digitalen Kartenprodukten (Maßstab 1:10000 bis 1:24000, evtl. besser) verwendet werden. Die für Bodenpunkte erreichten Genauigkeiten werden in der Ebene bzw. Höhe bei 3 m bzw. 2 m erwartet [LZY⁺00].

Die Stereodaten stellen eine multiangulare Aufnahme dar (siehe rechte Illustration in Abb. 6.1), d.h. auch diese beinhalten die Eigenschaften der winkelabhängigen Reflexion von Oberflächen. Es stellt sich somit die Frage, ob neben der Erstellung eines Höhenmodells auch noch zusätzliche Informationen, z.B. für Klassifikationsaufgaben, gewonnen werden können.

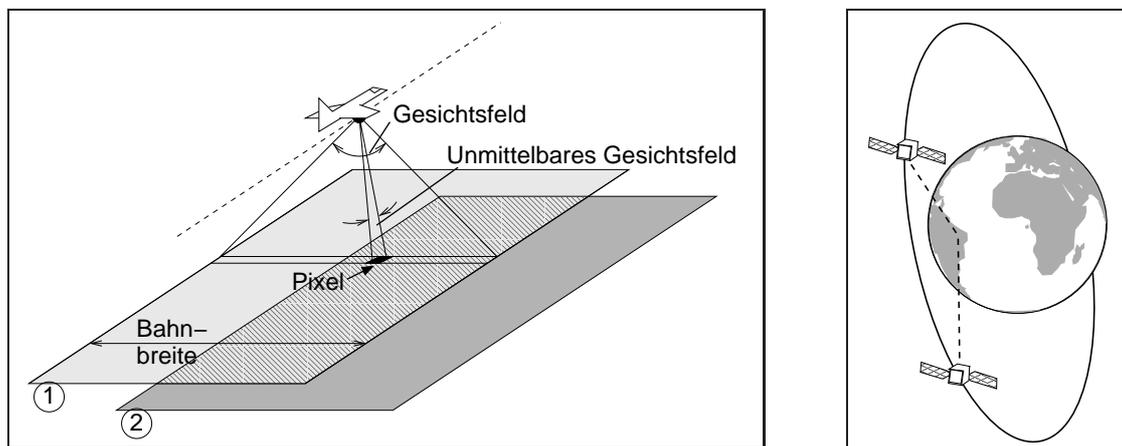


Abbildung 6.1: Illustration zur Datennahme unter verschiedenen Beobachtungswinkeln. Die linke Abbildung illustriert die Datennahme mit einem Zeilenscanner, welcher in kurzen Zeitabstand ein Gebiet entlang zweier parallel ausgerichteter Flugrichtungen befliegt. Die resultierenden Flugstreifen sind durch die Flächen (1) und (2) angedeutet. Die schraffiert dargestellte Fläche ist in beiden Flugstreifen vorhanden und wurde dabei mit verschiedenen Beobachtungswinkeln aufgenommen. Bei hinreichend kleinem Zeitunterschied zwischen den beiden Befliegungen können die Beleuchtungswinkel als konstant angenommen werden. Die rechte Abbildung illustriert die Datennahme mit einem Satelliten, welcher durch Ändern der Aufnahmewinkel entlang seiner Bahn ein Gebiet unter verschiedenen Beobachtungswinkeln sieht.

Die folgende Studie soll den zusätzlichen Informationsgehalt abschätzen, welcher durch die Beobachtung derselben Bildszene aus zwei verschiedenen Richtungen zu erwarten ist. Dabei wird auf zu berücksichtigende Gegebenheiten bei der Verwendung von Luftbildern eines Zeilenscanners eingegangen und ein in diesem Zusammenhang entwickelter Schattenfilter eingeführt.

6.1 Unterschiede in der Klassifikation aufgrund verschiedener Winkelstellungen

6.1.1 Vorbemerkung

Die computergestützte Klassifikation³ von städtischen Gebieten erfolgt größtenteils anhand multi- bzw. hyperspektraler Reflektanzbilder von flugzeuggetragenen, räumlich hochauflösenden Sensoren. Für ein Gebiet stützt man sich dabei im Regelfall auf Daten eines einzelnen Flugstreifens und vermeidet nach Möglichkeit Beleuchtungssituationen, in denen ausgeprägte BRDF-Effekte erwartet werden. Dies wird dadurch erreicht, daß

- durch die Wahl des Beobachtungszinuskwinkels möglichst senkrecht zur Einstrahlungsrichtung der Sonne etwaige BRDF-Effekte vielfach minimiert werden,
- der eingeschränkte Winkelbereich der Sensoren (z.B. beträgt der maximale Beobachtungszinuskwink beim DAEDALUS $\approx 43^\circ$.) häufig extreme Unterschiede in der winkelabhängigen Reflexion vermeidet.

Für die Klassifikation städtischer Gebiete mit räumlich hochaufgelösten Daten spielen Unterschiede in den Reflektanzwerten durch geneigten Flächen⁴ eine deutlich dominierendere Rolle als BRDF-Effekte, welche eher Effekte zweiter Ordnung darstellen⁵. Ein Großteil der bei geneigten Dachflächen auftretenden BRDF-Effekte⁶ ist immer noch kleiner als der bei diesen durch die Beleuchtungsannahme herrührende Reflektanzunterschied.

Im Gegensatz zu den Daten von flugzeuggetragenen Zeilenscannern ist durch die Bestimmung von Höhenmodellen anhand hochauflösender Stereo-Satellitenbilder zu erwarten, daß bei der Berechnung von Reflektanzbildern städtischer Flächen der Flächenneigung besser Rechnung getragen werden wird. BRDF-Effekten kann dadurch eine stärkere Bedeutung als bisher zukommen. Es ist daher zu untersuchen, welchen Beitrag BRDF-Effekte zu leisten vermögen.

³Durch eine Klassifikation wird eine Einteilung eines komplexen Datensatzes in Klassen vorgenommen. Diesen Klassen werden Informationsklassen zugewiesen und so der Bezug zu den Originaldaten hergestellt, d.h. es wird eine Einteilung von Reflektanzspektren in Informationsklassen wie z.B. Vegetation, Straße, Parkplatz o.ä. vorgenommen. Prinzipiell wird bei der Klassifikation zwischen *unüberwachten* und *überwachten* Verfahren unterschieden. Grundlegende Verfahren sind z.B. in [DH73, Ric93] zu finden, Vergleiche zwischen verschiedenen Klassifikationsverfahren finden sich z.B. in [Kul97, Reg00].

⁴Durch die Annahme ebener Flächen bei der Berechnung der Reflektanzwerte sind z.B. Spitzdächer auch noch als solche durch eine helle und dunkle (Teil-)Dachfläche in einem Reflektanzbild zu erkennen und nur schwer bzw. gar nicht durch *ein* repräsentatives Reflektanzspektrum zu klassifizieren. Eine Verbesserung im Klassifikationsergebnis läßt sich in einem solchen Fall z.B. durch Helligkeits-Normierung und Änderungen am spektralen Verlauf der Spektren schaffen [Wie98].

⁵Für eine Vielzahl von Winkelkombinationen betragen die relativen Abweichungen vom Lambertischen Reflexionsverhalten zwischen 0 und 5–10%. Die Unterschiede in den Reflektanzwerten aufgrund einer nicht berücksichtigten Dachneigung können deutlich mehr betragen. Ausgehend von den Sonnenständen zum Zeitpunkt der Befliegungen 1997 mit Einfallszinuskwinkeln von 40° bzw. 60° können bei einem um 20° geneigten Dach relative Abweichungen von maximal -53% bzw. $+65\%$ auftreten. Gemittelt über Azimutausrichtungen der Dächer von $0 - 360^\circ$ betragen die relativen Abweichungen 30%.

⁶bezogen auf die Flächennormalen von geneigten Dachflächen kann eine für BRDF-Effekte bedeutsamere Beleuchtungsgeometrie auftreten

6.1.2 Datenmaterial

Die Nutzung von Effekten der winkelabhängigen Reflexion in der rechnergestützten Bildauswertung wird im Folgendem anhand der Daten der Nürnberg-Befliegung von 1997 illustriert. Als Untersuchungsgebiet wurde das Gewerbegebiet 'Andernacher Str.' gewählt. Dieses ist durch eine größere Anzahl von Gebäuden mit Flach- bzw. nur wenig geneigten Dächern gekennzeichnet. Etwaige Reflektanzunterschiede sind auf BRDF-Effekte zurückzuführen.

Die Datensätze entstammen den Flugstreifen der am Morgen sowie am Mittag durchgeführten Befliegungen und ermöglichen den Vergleich von Klassifikationsergebnissen bei

a) *unterschiedlichen Beobachtungswinkeln:*

Die Bilddaten entstammen verschiedenen Flugstreifen, welche zur Mittagszeit aufgezeichnet wurden und deren Aufnahmezeitpunkte einige Minuten auseinanderliegen. Durch einen räumlichen Versatz zwischen den Flugstreifen wurde das Gewerbegebiet unter verschiedenen Scanwinkeln beobachtet (vgl. Abb.6.1, links). Die Beobachtungsebenen des Zeilensensors lagen für die Überflüge möglichst parallel zur Hauptebene (Einfallrichtung der Sonne).

b) *unterschiedlichen Beleuchtungswinkeln:*

Die Bilddaten entstammen zwei Flugstreifen, welche am Morgen und zur Mittagszeit aufgezeichnet wurden. Die Flugstreifen zeigen zueinander einen geringen räumlichen Versatz, d.h. das Gewerbegebiet wurde unter sehr ähnlichen Beobachtungswinkeln, aber unterschiedlichen Beleuchtungswinkeln beobachtet.

Abb. 6.2 illustriert die verwendeten Datensätze. Die Teilabbildungen 1–3 verdeutlichen das Datenmaterial im Fall a) und entstammen verschiedenen Flugstreifen der Befliegung zur Mittagszeit. Teilabbildung 4 entstammt den Daten der morgendlichen Befliegung und bildet mit Teilabbildung 2 die Datenbasis im o.g. Fall b).

Die Ausschnitte der Flugstreifen sind in ihrer vollen Scanbreite dargestellt. Die Beobachtungsrichtung senkrecht auf den Boden ($\theta_r = 0^\circ$) ist jeweils durch die gestrichelte gekennzeichnet, an den Bildrändern eines Flugstreifens beträgt der Beobachtungswinkel $\theta_r = 43^\circ$. Die ungefähre Lage des Gewerbegebietes ist durch einen weißen Rahmen gekennzeichnet.

6.1.3 Klassifikation von Reflektanzbildern

Aus den vorhandenen Datensätzen wurde ein Reflektanzbild der Mittags-Befliegung (Teilabbildung 2) als Basisdatensatz gewählt. Dieser wurde mittels einer unüberwachten 'Minimum Distance'-Klassifikation⁷ in 11 Informationsklassen eingeteilt. Als Ausgangspunkt für das iterative Verfahren wurde die Verteilung der Klassenzentren als gleichmäßig

⁷Die unüberwachte Klassifikation bedarf nicht der Vorgabe von Referenzmerkmalen. Durch sie wird in den gesammelten Daten iterativ nach Häufungspunkten innerhalb eines mehrdimensionalen Merkmalsraumes gesucht und so eine Klasseneinteilung vorgenommen. Dieser müssen im Anschluß Informationsklassen durch den Nutzer zugewiesen werden.

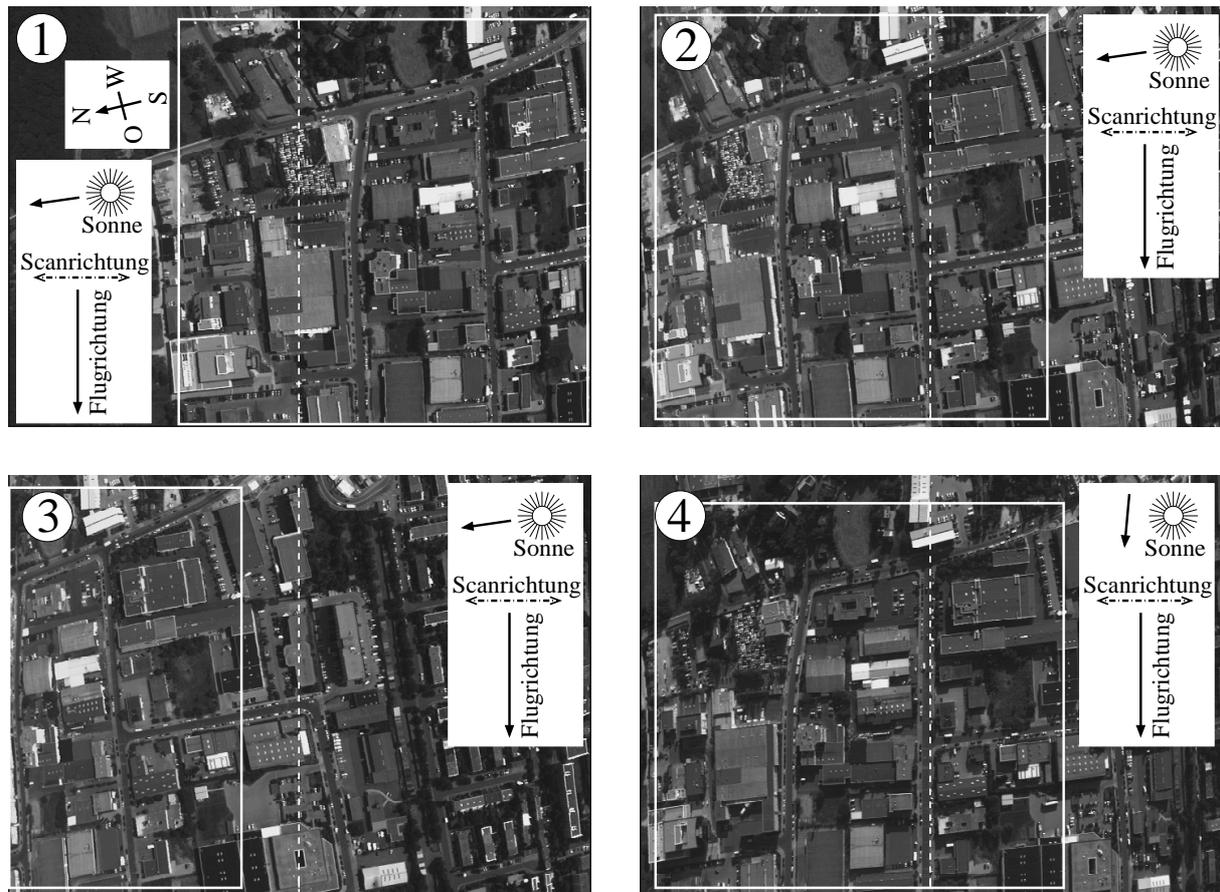


Abbildung 6.2: Illustration der Datensätze für die Klassifikation. Dargestellt ist das Gewerbegebiet 'Andernacher Str.' (weißer Rahmen) in verschiedenen Datensätzen. Die Teilabbildungen 1–3 zeigen es in Datensätzen, welche zur Mittagszeit aufgenommen wurden. Wegen unterschiedlicher Flugbahnen erscheint das Gebiet in verschiedenen Bereichen eines Datensatzes, d.h. eine Oberfläche wurde unter verschiedenen Beobachtungswinkeln aufgenommen (die gestrichelte Linie kennzeichnet Nadir). Die Beleuchtungswinkel sind für die Teilabbildungen 1–3 in guter Näherung gleich. Teilabbildung 4 wurde am Morgen aufgenommen. Das Gewerbegebiet wurde unter zu Teilabbildung 2 vergleichbaren Beobachtungswinkeln aufgenommen, d.h. der Unterschied zwischen den Teilabbildungen 2 und 4 liegt im wesentlichen in den Beleuchtungswinkeln. Die Abbildungen zeigen den Kanal 5 (630–690 nm) der 10 DAEDALUS-Kanäle. Zur besseren Darstellung wurden die Grauwerte reskaliert und im Maximum begrenzt (in gleichem Maß bei allen Bildern).

entlang der Diagonalen des mehrdimensionalen Merkmalsraumes vorgegeben, wobei der maximale Reflektanzwert etwa 60 Reflektanzprozent betrug. Die sich aus der unüberwachten Klassifikation ergebenden Klassenzentren (11 Reflektanzspektren) wurden anschließend dazu verwendet, die übrigen Reflektanzbilder überwacht zu klassifizieren. Abb. 6.3 zeigt die Vorgehensweise nochmals in grafischer Form.

Wenn es sich bei den Oberflächen um Lambert-Strahler handelt, so würden die einzelnen

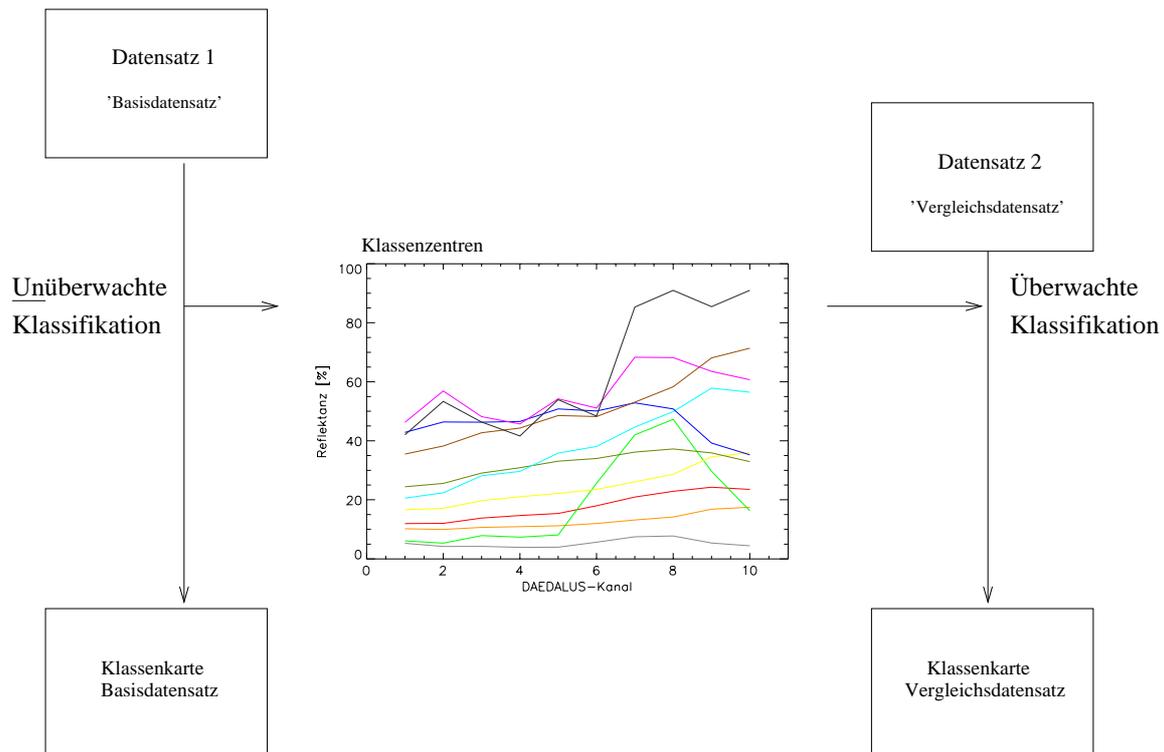


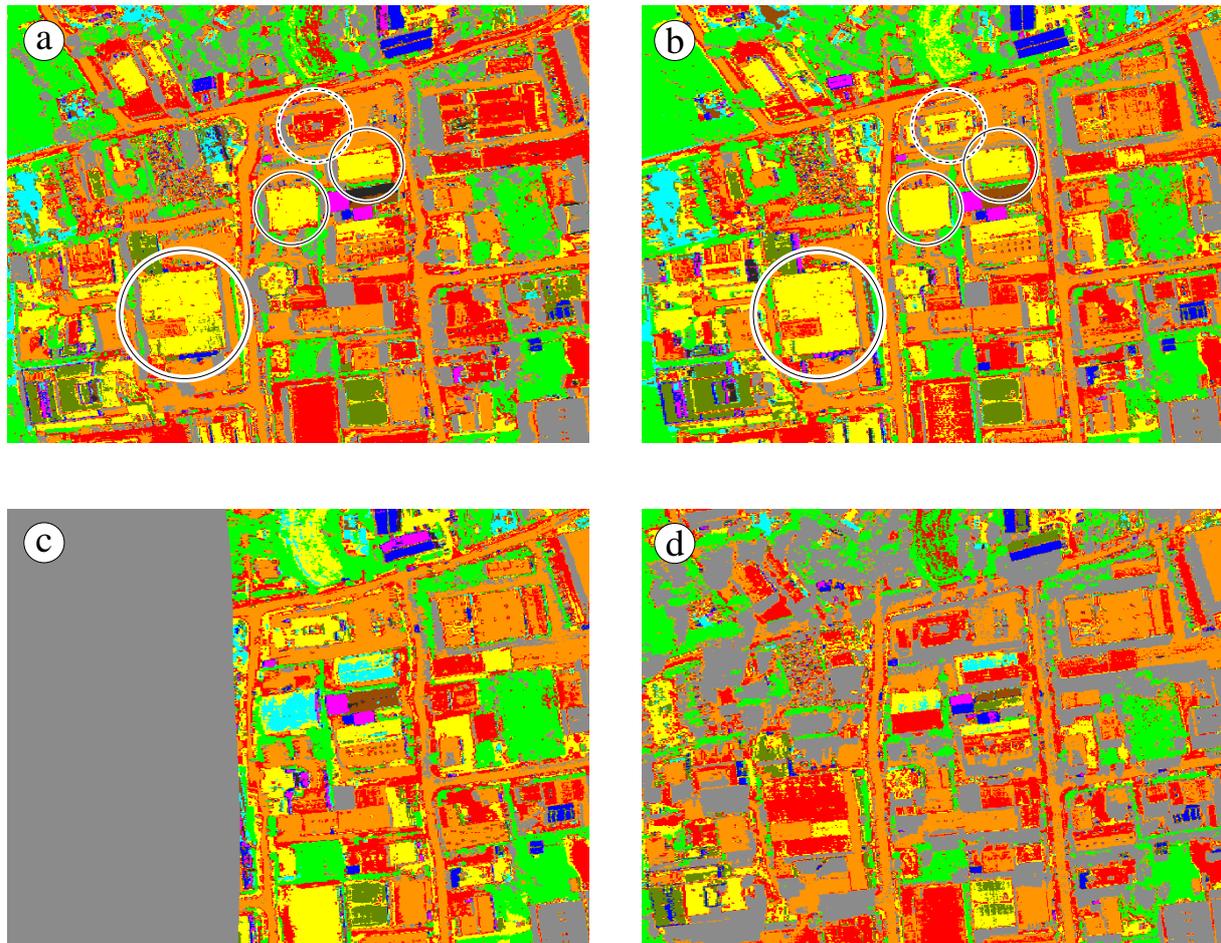
Abbildung 6.3: Illustration zur Vorgehensweise bei der Klassifikation.

Oberflächen in den verschiedenen Datensätzen in dieselbe Informationsklasse eingeteilt. Finden sich für einzelne Oberflächen Änderungen in der Klassenzuweisung, so können diese durch BRDF-Effekte hervorgerufen worden sein und stellen dann eine zusätzliche Information über eine Oberfläche dar.

Abb. 6.4 zeigt die zu den verschiedenen Datensätzen berechneten Klassenkarten. Diese zeigen die in den verschiedenen Datensätzen vorkommenden Ausschnitte des Gewerbegebietes, die Anordnung der Klassenkarten entspricht der in Abbildung 6.2. Im Hinblick auf eine mögliche rechnergestützte Zusammenführung der Datensätze wurden die Bilder zudem auf den Panorama-Effekt⁸ korrigiert und aufeinander registriert. Die angegebene Klasseneinteilung bezieht sich auf den Basisdatensatz (rechte obere Karte in Abb. 6.4) und soll gefundene Ähnlichkeiten bzw. Unterschiede zwischen den Informationsklassen herausheben. Es wird daher lediglich zwischen verschiedenen Dach-Klassen unterschieden, ohne eine eindeutige Zuweisung eines Oberflächenmaterials vorzunehmen.

Bereits bei einem visuellem Vergleich der Bilder ist zu erkennen, daß eine Vielzahl von Flächen unabhängig vom gewählten Datensatz in die gleiche Informationsklasse eingeteilt

⁸Ein Scanner mit konstantem Sensor-Öffnungswinkel ('Unmittelbares Gesichtsfeld' in linker Grafik von Abb. 6.1) mißt die Daten je nach Scanwinkel aus verschiedenen Entfernungen, wodurch sogenannte *Panoramaverzerrungen* entstehen. Diese sind mathematisch exakt zu beschreiben und können ausgeglichen werden [Wie96].



Klassenzuweisung im Basisdatensatz (oben rechts)

- | | |
|--|---------------------------|
| ■ Klasse Bitumendach dunkel / Schatten | ■ Klasse Boden / Sand |
| ■ Klasse Straße / Bitumendach hell | ■ Klasse Dach 4 |
| ■ Klasse Dach 1 / Betonflächen | ■ Klasse Dach 5 |
| ■ Klasse Vegetation | ■ Klasse Dach 6 / Fassade |
| ■ Klasse Dach 2 | ■ Klasse Fassade |
| ■ Klasse Dach 3 | |

Abbildung 6.4: Klassenkarten des Gewerbegebietes 'Andernacher Straße', berechnet aus den Datensätzen der Abb. 6.3. Der Datensatz von Grafik b) wurde als Basisdatensatz gewählt und unüberwacht in 11 Klassen klassifiziert. Die daraus bestimmten Klassenzentren wurden als Vorgabe für die Klassifikation der verbleibenden Datensätze verwendet (Klassenkarten a), c) und d) entstammen also einer überwachten Klassifikation). Die Kreise kennzeichnen ein Beispiel von gleicher (durchgezogene Linie) bzw. verschiedener (gestrichelte Linie) Klassenzuweisung.

wird. So zeigt sich zum Beispiel, daß Straßen in allen Datensätzen in die gleiche Informationsklasse eingeteilt werden. Das gilt auch für einen Großteil der Vegetationsflächen, obwohl gerade diese als stärkere BRDF-Effekte aufweisende Flächen bekannt sind. Die Ursache für diese einheitliche Klassifikation von Vegetation ist im charakteristischen Verlauf der Spektren zu sehen, welcher sich deutlich von den Reflektanzspektren anderer Oberflächen unterscheidet und dadurch eine größere Variationen innerhalb des spektralen Verlaufs bei der Klassifikation zuläßt. Abhängig davon, welche Klassenkarten miteinander verglichen werden, zeigen sich bei verschiedenen Oberflächen aber auch Änderungen in der Zuweisung der Informationsklasse. Exemplarisch hierfür ist der Vergleich der vier in den oberen Teilabbildungen markierten Dachflächen. Während sich für drei der Dachflächen keine Unterschiede in der Klassenzuweisung beider Klassenkarten zeigen, erscheint die vierte Oberfläche in der Basis-Klassenkarte (oben rechts) der Klasse 'Dach 2' zugehörig, in der anderen Klassenkarte wird sie der Klasse 'Dach 1 / Betonfläche' zugeordnet. Die Oberfläche zeigt keine eindeutige Zugehörigkeit zu einer der beiden Klassen. Sie ist vielmehr als eine eigenständige Klasse zu sehen, welche sich erst aus der Betrachtung beider Klassenkarten (in diesem Fall also der Bewertung zweier verschiedener Beobachtungsrichtungen) zu erkennen gibt.

Um einen potentiellen Zugewinn an Informationen über eine Oberfläche aufgrund von BRDF-Effekten rechnergestützt zu erfassen, bedarf es des Vergleichs von mindestens zwei Datensätzen bzw. deren Klassenkarten. Im Fall der hier betrachteten *pixelbasierten* Analyse wurden die Daten dazu aufeinander registriert und es werden die Klassenkarten miteinander verglichen. Generell zu beachten ist, daß nicht alle Unterschiede zwischen den Klassenkarten durch BRDF-Effekte hervorgerufen werden. Wie den Klassenkarten in Abb. 6.4 zu entnehmen ist, bilden unterschiedliche Anteile bzw. Orientierungen von Schattenflächen sowie Fehlregistrierungen systematische Fehlerquellen. Zur Vermeidung von Fehlerquellen aufgrund abgeschatteter Flächen wurde der im Folgenden beschriebene Schattenfilter entwickelt.

6.1.4 Der Schattenfilter

Wir nutzen die unterschiedliche spektrale Zusammensetzung von Sonnen- und Himmelslicht, um Schattenflächen zu erkennen.

Spektren bei Sonnen- und Himmelslicht

Die einfallende Strahlung setzt sich aus den beiden Anteilen *Sonnenlicht* und *Himmelslicht* zusammen. Das Sonnenlicht ist der Anteil der Strahlung, der direkt, also aus der Richtung der Sonne kommend, auf die Oberfläche fällt. Das Himmelslicht ist der Beitrag der Strahlung, welche aus dem gesamten oberen Halbraum der Himmelskugel auf die Oberfläche trifft. Das Himmelslicht resultiert aus Streuprozessen des Sonnenlichtes mit den Molekülen der Atmosphäre, der sogenannten *Rayleigh-Streuung*. Der Streuquerschnitt $\sigma_{\text{Ray}}(\lambda)$ der Rayleigh-Streuung ist umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge λ und hat zur Folge, daß sich die spektrale Zusammensetzung des Himmelslichtes von der Zusammensetzung des direkten Anteils unterscheidet. Vergleicht man grob

die Streuquerschnitte von blauem und roten Licht, so ist zu sehen, daß das kurzwelligere Licht deutlich stärker gestreut wird:

$$\frac{\sigma_{\text{Ray}}(\text{Blau})}{\sigma_{\text{Ray}}(\text{Rot})} \approx \left(\frac{440 \text{ nm}}{660 \text{ nm}}\right)^{-4} \approx 5 \quad (6.1)$$

Schattenflächen werden nur vom Himmelslicht beleuchtet, wodurch abgeschattete Flächen durch langwelliges Licht nur zu einem geringen Anteil beleuchtet werden und entsprechend auch nur ein geringes Signal meßbar ist. Können wir nun eine untere Grenze im Reflektanzspektrum von durch Sonnen- und Himmelslicht beleuchteten Flächen angeben, so stellen Flächen mit kleineren Reflektanzen Schattenpixel dar.

Innerhalb unseres Befliegungsgebietes von Nürnberg finden wir niedrige absolute Reflektanzwerte für Wasser- und Asphaltflächen. Die Spektren abgeschatteter Flächen liegen in der Regel oberhalb der Spektren von Wasser, lassen aber in Bezug auf die Asphaltflächen keine eindeutige Bewertung zu. Je nach Wellenlängenbereich, Asphalttyp und Typ der abgeschatteten Probe finden sich die Spektren von Schattenpixeln mal ober-, mal unterhalb der Asphaltspektren. Es läßt sich dadurch kein eindeutiger Schwellwert festlegen, welcher eine Trennung von beleuchteten und abgeschatteten Flächen ermöglicht. Durch die Kombination mehrerer Merkmale ist es allerdings möglich, eine adäquate Auswahl von Schattenpixeln zu treffen. Die zur Bestimmung der Schattenpixel von uns genutzten Kriterien werden im folgenden genannt, ebenso werden die sich aus ihnen ergebenden Teilergebnisse exemplarisch an einer Szene eines Gewerbegebietes illustriert.

Im Hinblick auf ein in unserer Arbeitsgruppe durchgeführtes Projekt [SFK⁺01] und eine mögliche Verwendung von anderen Satellitendaten geschieht die Illustration der Schattenbestimmung anhand einer IKONOS-Bildszene und dessen vier Spektralbändern, welche eine Teilmenge der Spektralbänder des DAEDALUS-Sensors bilden. Das als Eingangsbild für den Schattenfilter notwendige Reflektanzbild wurde durch R. Richter, DLR, Oberpfaffenhofen mit dem von ihm entwickelten Programm ATCOR⁹ erstellt. Für einen Überblick zeigt Abb. 6.5 den Inhalt der Bildszene, das Gewerbegebiet 'Andernacher Straße'.

Auswahlkriterien für Schatten

Bei direkter Beleuchtung stellen, abgesehen von Wasserflächen, die Asphaltflächen die Spektren niedrigster absoluter Reflektanz innerhalb unseres Befliegungsgebietes. Ausgehend von einer Reflektanz der Asphaltflächen zwischen 10 und 15 % und den in Kap. 3.1.4 bestimmten Unsicherheiten, sehen wir als potentielle Schattenpixel diejenigen, deren Reflektanzwerte im längerwelligen Spektralbereich (Rot, NIR) unterhalb von absolut 0.07 liegen (Kriterium 1).

Abb. 6.6 zeigt die sich aus diesem Kriterium ergebenden Kandidaten. Neben tatsächlichen Schattenpixeln werden auch Wasserflächen sowie extrem dunkle Dachflächen als Kandidaten erkannt. Es ist daher nötig, weitere Kriterien zu finden, um zwischen den durch das Kriterium 1 bestimmten Kandidaten zu unterscheiden.

⁹Atmospheric Correction and Haze Removal of Multispectral and Hyperspectral Satellite Images.

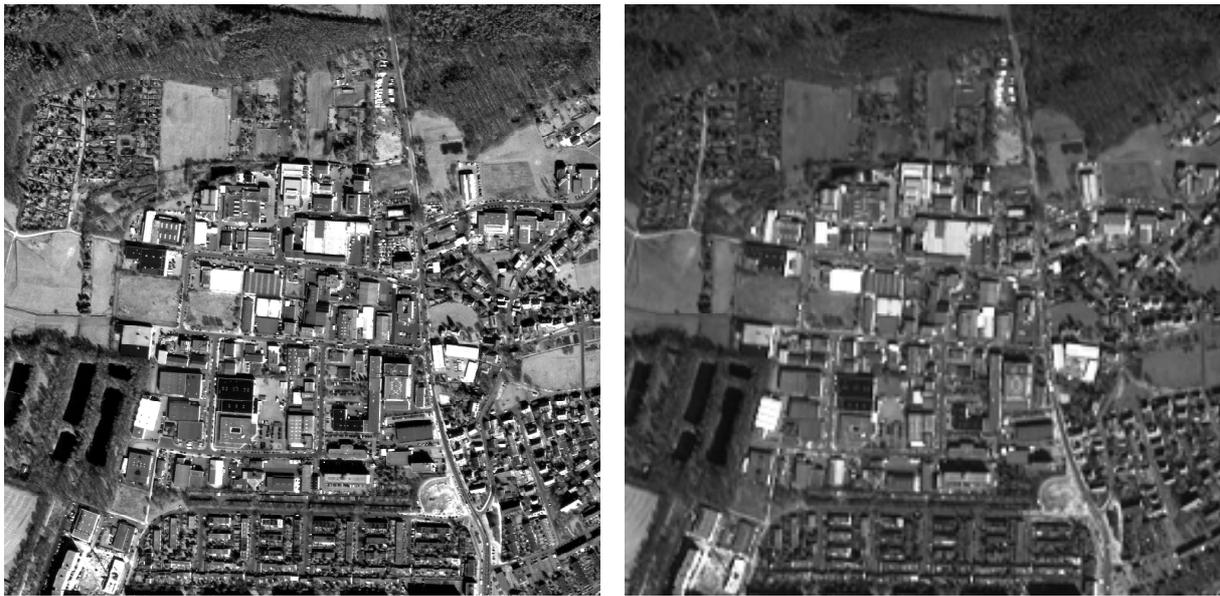


Abbildung 6.5: Gewerbegebiet 'Andernacher Straße', Nürnberg, März 2000. Die linke Abbildung zeigt die Bildszene im Panchromatischen bei 1 m Pixelgröße und dient lediglich der besseren Anschauung. Die rechte Abbildung zeigt die Bildszene bei 4 m Pixelgröße, dargestellt ist der Mittelwert der Rohdaten der vier Multispektralkanäle. Die Beleuchtung erfolgt vom unteren Bildrand her. Das in Reflektanzwerte umgerechnete Multispektralbild mit 4 m-Pixeln ist das Eingangsbild für den Schattenfilter.

Bei voller Beleuchtung durch direktes Sonnenlicht und Himmelslicht zeigen im wesentlichen Wasserflächen die niedrigsten absoluten Reflektanzspektren. Wir verwendeten daher eine aus unseren Daten bestimmte Obergrenze der Reflektanzwerte für voll beleuchtete Wasserflächen, um diese von den potentiellen Schattenpixeln der Abb. 6.6 zu unterscheiden. Die Wahl einer Obergrenze für Wasserflächen bedeutet dann ebenfalls, daß dadurch auch beschattete Wasserflächen erfaßt und von den potentiellen Schattenpixeln ausgeschlossen werden. Lediglich Bildpixel mit Reflektanzwerten größer als 0.02 im blauen Spektralbereich sollen in der Bestimmung der potentiellen Schattenpixel berücksichtigt werden, die übrigen Pixel sollen als Kandidaten ausgeschlossen werden. Abb. 6.7 zeigt das Ergebnis nur des zweiten Kriteriums. Pixel mit Reflektanzwerten größer als 0.02 im blauen Spektralbereich sind weiß dargestellt, schwarz gefärbte Bildpunkte werden als potentielle Schattenpixel ausgeschlossen.

Durch das zweite Kriterium (K2) werden neben den Wasserflächen auch eine Vielzahl weiterer Flächen selektiert. Dieses Teilergebnis reicht für sich alleine genommen nicht aus, nur einzelne Wasserflächen zu bestimmen. Bei näherer Betrachtung ist allerdings festzustellen, daß es sich bei einem Großteil der selektierten Flächen um abgeschattete Vegetationsflächen handelt, über welche durch ein drittes Kriterium eine zusätzliche Aussage getroffen werden kann.

Vegetationsflächen lassen sich aufgrund ihres charakteristischen spektralen Verlauf-

Abbildung 6.6: Potentielle Schattenpixel nach dem Kriterium 1 (inverse Ergebnisdarstellung, pot. Schattenpixel sind schwarz dargestellt)

$$K1 = \begin{cases} 1 & : \frac{\rho(\text{rot}) + \rho(\text{NIR})}{2} < 0.07 \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases}$$

1 : schwarz
0 : weiß



Abbildung 6.7: Ergebnis des Kriteriums 2, schwarz gefärbte Bildpunkte werden von diesem Kriterium als potentielle Schattenpixel ausgeschlossen.

$$K2 = \begin{cases} 1 & : \rho(\text{blau}) > 0.02 \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases}$$

1 : weiß
0 : schwarz



fes sehr gut über den NDVI¹⁰ detektieren. Der NDVI erlaubt die Unterscheidung von Vegetations- und Nicht-Vegetationsflächen und ermöglicht es dadurch, Vegetationsflächen gesondert bei der Bestimmung der Schattenflächen zu behandeln. Das über den NDVI erhaltene Teilergebnis ist in Abb. 6.8 dargestellt. Neben einem Großteil der abgeschatte-

¹⁰NDVI: Normalized Difference Vegetation Index. Die spektrale Signatur von Vegetation zeigt einen charakteristischen Anstieg der Reflektanz ρ beim Übergang vom roten Spektralbereich (R; 0,63 - 0,69 μm) zum Nahen Infrarot (NIR; 0,76 - 0,90 μm). Dieser Umstand kann zur Erkennung von Vegetation verwendet werden, indem man sich das Verhältnis $\text{NDVI} = \frac{\rho(\text{NIR}) - \rho(\text{R})}{\rho(\text{NIR}) + \rho(\text{R})} \in [-1, +1]$ zu Nutze macht. Typische Werte des NDVI betragen für Vegetation zwischen 0,3-0,5, für Asphalt zeigen sich vielfach Werte kleiner 0,1.

Abbildung 6.8: Ergebnis des Kriteriums 3. Weiße Pixel stellen voll beleuchtete sowie beschattete Vegetationsflächen dar.

$$K3 = \begin{cases} 1 & : \frac{\rho(\text{NIR}) - \rho(\text{rot})}{\rho(\text{NIR}) + \rho(\text{rot})} > 0.4 \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases}$$

1 : weiß
 0 : schwarz



ten Vegetationsflächen beinhaltet dieses Teilergebnis auch die beleuchteten Vegetationsflächen.

Aus den o.g. drei Teilkriterien läßt sich durch die Kombination $F = (K2 \vee K3) \wedge K1$ die in Abb. 6.9 gezeigte Filtermaske F gewinnen. Diese zeigt neben den Schattenpixeln allerdings auch noch einige extrem dunkle Dächer, welche mit Bitumen gedeckt sind. Diese lassen sich durch die genannten spektralen Auswahlkriterien nicht von den Schattenpixeln unterscheiden.

Abbildung 6.9: Ergebnismaske der Kombination der Kriterien K1 - K3. (inverse Darstellung, Schattenflächen sind schwarz dargestellt.)

$$F(i,j) = (K2(i,j) \vee K3(i,j)) \wedge K1(i,j)$$

$$= \begin{cases} 1 & : \text{Schatten} \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases}$$

1 : schwarz
 0 : weiß



Die aufgrund der drei o.g. Kriterien K1 - K3 nicht auszuschließenden dunklen Dachflächen lassen sich aus der generierten Maske F im Nachhinein dadurch entfernen, daß als

weiteres Merkmal die Form bzw. die Kompaktheit von Objekten berücksichtigt wird. Hierzu führten wir eine Segmentation¹¹ der Filtermaske F (Abb. 6.9) durch und bestimmten Größe und Umfang der einzelnen Schattenobjekte der Filtermaske F . Durch Entfernen der Objekte, welche a) mehr als 25 Pixel umfassen (entspricht der Fläche eines Quadrates von $20\text{ m} \times 20\text{ m}$) und zugleich b) ein Verhältnis von Umfang zu Fläche von weniger als 0.68 aufweisen, ließ sich die in Abb. 6.10 gezeigte Schattenmaske SM bestimmen¹².

Abbildung 6.10: Schattenmaske; es wurden Objektgröße und Umfang berücksichtigt.

Schritt 1: Segmentation von F aus Abb. 6.9

Schritt 2:

$$SM(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{Segment}(i, j) \text{ hat} \\ & \text{Fläche} > 25 \text{ Pixel} \\ & \text{UND} \\ & \text{Umfang} / \text{Fläche} < 0.68 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases}$$

1 : schwarz

0 : weiß



Durch die Berücksichtigung der Objektgröße sowie dessen Fläche können insbesondere kompakte Objekte aus der Filtermaske F genommen werden. Der Schwellwert zur Betrachtung lediglich großer Flächen wurde anhand typischer Ausdehnungen von Schattenwürfen und Hallengrößen im Gewerbegebiet bestimmt. Man beachte, daß im genannten Kriterium die Objektgröße selbst zur Entscheidung über den Ausschluß oder den Verbleib in der Schattenmaske beiträgt. Ein Vergleich mit einem Alternativ-Kriterium findet sich im Anhang A.7.

Bei Verwendung von Reflektanzbildern mit mehr als vier Kanälen können die zu den IKONOS-Kanälen korrespondierenden Bänder verwendet werden. Abhängig von Kanal-

¹¹Die von der Arbeitsumgebung IDL (Interactive Data Language, Fa. Research Systems, Inc., 4990 Pearl East Circle, Boulder, CO 80301, USA, <http://www.rsinc.com>) angebotene Segmentierungsfunktion liefert als Segmentierungsergebnis ein Integer-Format (d.h. max. $2^{16} = 65535$ Objekte + Hintergrund) und erfordert z.B. bei der Verwendung von IKONOS-Gesamtszenen die Berechnung von Teilsegmentationen. Zudem muß die Bestimmung der aufgrund ihrer Größe überhaupt weiter zu betrachtenden Objekte in einem separaten Rechenschritt erfolgen. Wegen der speziell für diese Betrachtung notwendigen Objektauswahl und nicht zuletzt aufgrund der besseren Handhabung größerer Bildszenen (weniger Speicher notwendig als bei IDL und dadurch deutlich mehr Geschwindigkeit) verwendeten wir ein in Zusammenarbeit mit U. Köthe geschriebenes Programm, welches auf der Computer Vision Bibliothek VIGRA (siehe auch <http://kogs-www.informatik.uni-hamburg.de/~koethe/vigra/>) basiert [Köt00].

¹²Die Übertragung des Schattenfilters auf andere Szenen (z.B. viele Hochhäuser in der Szene oder landwirtschaftliche Gebiete) bedarf einer Anpassung der Parameter.

zahl und Bandbreite des Bildmaterials ist zudem auch eine Erweiterung bzw. Verfeinerung der Auswahlkriterien möglich. Mit den genannten Parametern ergeben sich für verschiedene Bildinhalte der Nürnberg-Szene (z.B. Landwirtschaftsflächen, Wohngebiet, Industriegebiet oder Wald) im Mittel 'akzeptable' Ergebnisse bei der Schattenbestimmung, wenn man zur Bewertung Konfusionsmatrix und κ -Wert heranzieht (siehe Anhang A.7.1).

6.1.5 Rechnergestützter Vergleich der Klassenkarten

Für die rechnergestützte Gegenüberstellung der Klassenkarten wurden zunächst die Schattenflächen in den einzelnen Flugstreifen durch Zuhilfenahme des o.g. Schattenfilters bestimmt. Die Parameter des Schattenfilters wurden dabei manuell dahingehend verändert, daß zum Einen die zum IKONOS-Satelliten verschiedene Pixelauflösung des DAEDALUS-Sensors Berücksichtigung findet und zum Anderen eine subjektiv bestmögliche Erkennung von Schattenflächen in dem gewählten Bildausschnitt vorliegt. Hierzu wurden folgende Veränderungen im Schattenkriterium K2 und im Form-Kriterium vorgenommen:

- In dem gewählten Bildausschnitt kommen keine Wasserflächen vor. Ein Ausschluß von extrem dunklen Flächen als (potentielle) Wasserflächen ist in dieser Bildszene nicht nötig und auf das Kriterium 2 kann verzichtet werden (anstelle von $\rho(\text{blau}) > 0.02$ wurde $\rho(\text{blau}) \geq 0$ verwendet).
- Die Pixelgrößen beim DAEDALUS betragen im verwendeten Bildausschnitt zwischen etwa 0,7 und 1,4 m. Die Pixelanzahl für quadratische Flächen von $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ fällt dadurch höher als bei der Beispielszene des IKONOS aus. Für die bei den DAEDALUS-Daten bestimmten Schattenmasken wurde beim Form-Kriterium eine Pixelanzahl von mehr als 670 Pixeln und ein Verhältnis von Umfang zu Fläche von 0,28 verwendet.

Abb. 6.11 zeigt die in den einzelnen DAEDALUS-Flugstreifen bestimmten Schattenflächen. Bei der Bestimmung von Unterschieden in der Klassenzuweisung werden alle Schattenpixel der jeweils zu vergleichenden Klassenkarten von der Betrachtung ausgeschlossen.

Neben den zu Schatten bestimmten Bildanteilen wurde der rechnergestützte Vergleich der Klassenkarten auf Objekte beschränkt, welche aus mehr als 300 Pixeln bestehen¹³. Hierdurch wird ein Großteil der Bildbereiche von der Betrachtung ausgeschlossen, für welche es aufgrund von Registrierungsungenauigkeiten zu Unterschieden in den Klassenkarten kommt.

Abb. 6.12 zeigt die so bestimmten Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten zwischen der Klassenkarte des Basisdatensatzes und den verschiedenen Vergleichsdatensätzen. Die jeweils verglichenen Klassenkarten sind entsprechend ihrer Bezeichnung in Abb. 6.4 am

¹³Hierzu wurden in der Klassenkarte des Basisdatensatzes (Grafik (b) in Abb. 6.4) die Schattenflächen der zu vergleichenden Datensätze als Schatten gekennzeichnet und das Ergebnis anschließend segmentiert. Für z.B. den Vergleich der Klassenkarten (b) und (c) der Abb. 6.4 wurden die Schattenflächen (Sb) und (Sc) aus Abb. 6.11 verwendet.

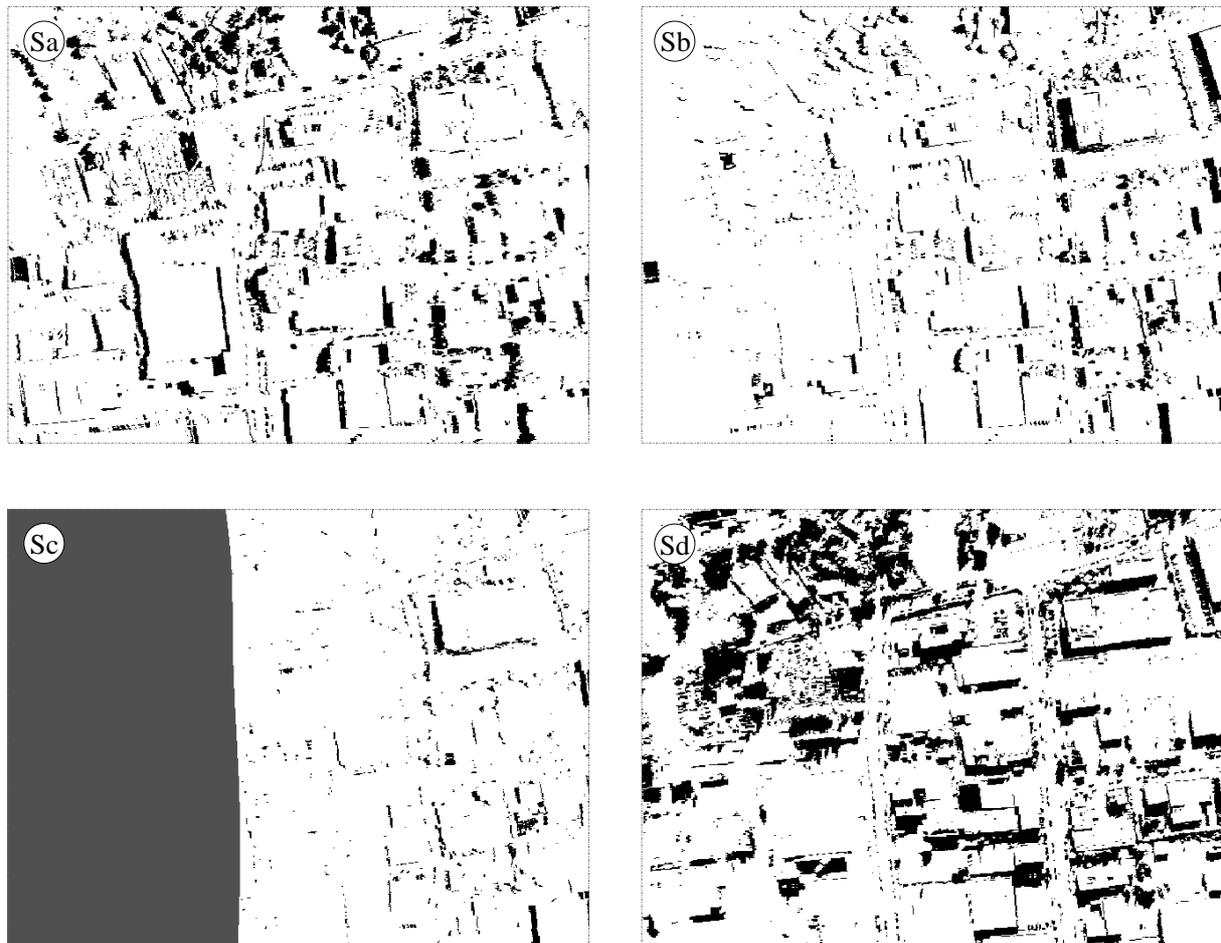


Abbildung 6.11: Schattenflächen in den verschiedenen Flugstreifen. Die gezeigten Abbildungen entsprechen den Ausschnitten der Abb. 6.4. In der Teilabbildung 'Sc' ist zusätzlich noch der Bildbereich 'grau' gekennzeichnet, für welchen keine entsprechenden Bilddaten vorliegen (vgl. auch Gegenüberstellung der Bildinhalte der mit '1' und '3' gekennzeichneten Flugstreifen in Abb. 6.2).

Zeilenanfang benannt. Die rechte Grafik einer Zeile zeigt, für welche Objekte der Basisklassenkarte die Mehrzahl der Pixel in der Vergleichsklassenkarte gleich klassifiziert wurde. Diese Pixel sind entsprechend ihrer ursprünglichen Klassenfarbe (siehe Legende in Abb. 6.4) eingefärbt. In dem Vergleich nicht berücksichtigte Objekte sind in schwarz (Schatten) oder weiß eingefärbt (Objekte mit weniger als 300 Pixeln). Objekte, für welche sich Unterschiede in der Klassifikation zwischen den verschiedenen Datensätze zeigen, sind in der rechten Grafik in einem hellen Grauton angezeigt.

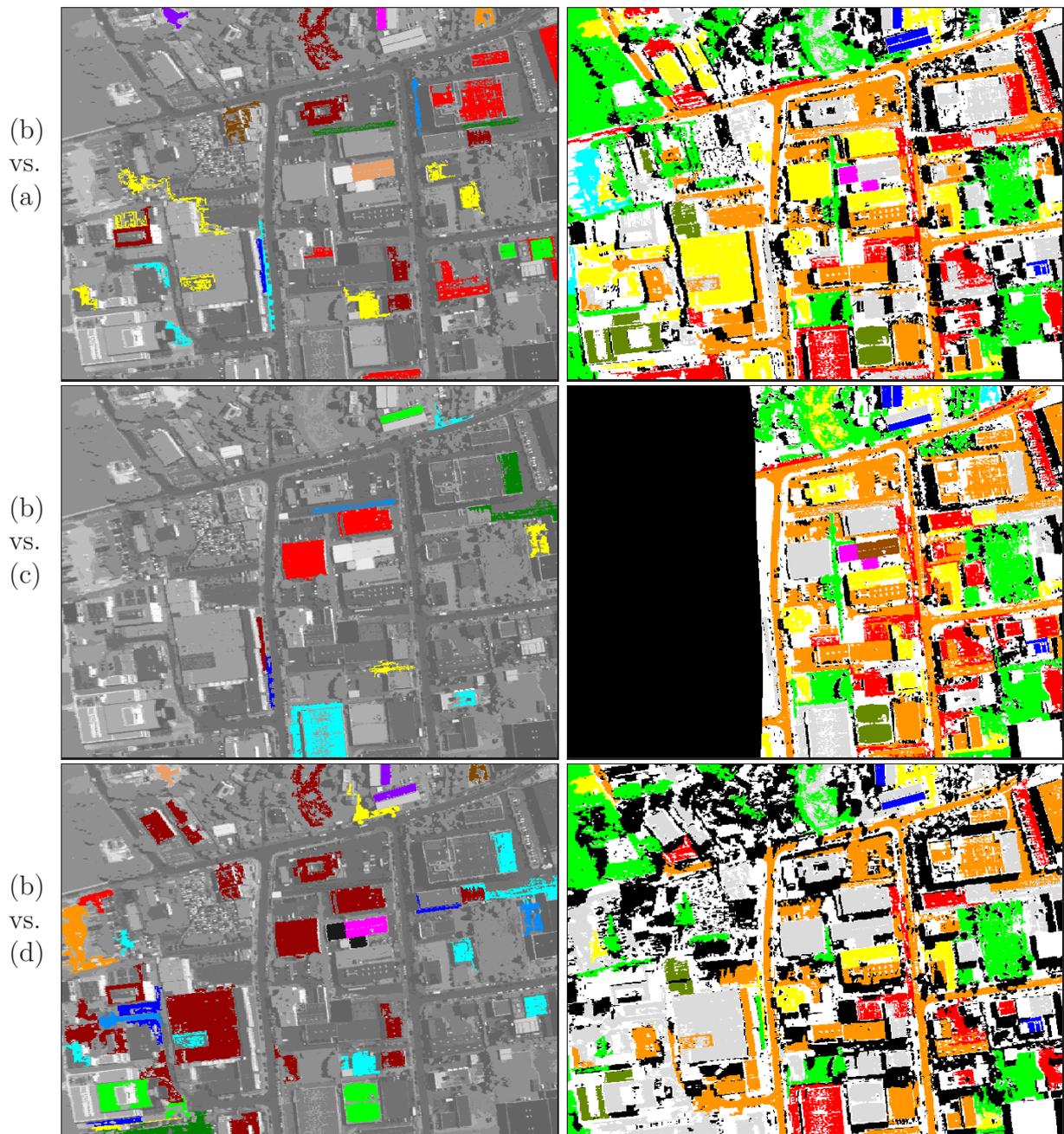


Abbildung 6.12: Illustration der Unterschiede zwischen Vergleichs- und Referenzdatensatz. Die Grafiken der rechten Spalte zeigen Objekte mit mehr als 300 Pixeln, bei denen sich die Klassenzuweisung zwischen Basis- und jeweiliger Vergleichsklassenkarte nicht geändert hat. Die Klassenfarbe entspricht der in Abb. 6.4. Objekte mit geänderter Klassenzuweisung sind hellgrau gefärbt. Nicht betrachtete Flächen sind schwarz (Schatten sowie fehlender Überlapp der Daten in 'b vs. c') bzw. weiß (Objekte mit weniger als 300 Pixeln) dargestellt. Die linken Grafiken zeigen Objekte, welche in den jeweils gegenübergestellten Daten unterschiedlich klassifiziert worden sind. In allen Grafiken der linken Spalte wurde die in Graustufen gewandelte Klassenkarte des Basisbildes als Hintergrund verwendet. *Man beachte, daß die Farbzweisungen in den Grafiken der linken Spalte nicht direkt miteinander vergleichbar sind.*

Die linke Grafik einer Zeile zeigt diese, Unterschiede in der Klassifikation aufweisende, Objekte nochmals in einer Farbdarstellung. Die Farbzuzuweisung entspricht in dieser Darstellung einem Unterschied zwischen den Klassenkarten und ist – trotz teilweise gleicher Farbe – von der Klassenfarbe in der rechten Grafik zu unterscheiden. In der linken Grafik bedeutet eine gleiche Farbe, daß die Objekte zwischen der Basisklassenkarte und der Vergleichsklassenkarte in der gleichen Weise unterschiedlich klassifiziert wurden¹⁴. Unterschiede in der Farbdarstellung in der linken Grafik bedeuten verschiedene Klassenänderungen¹⁵. Man beachte, daß aufgrund der Vielzahl von möglichen Klassenunterscheidungen die Grafiken (Farbzuzuweisung) der linken Spalte nicht direkt miteinander vergleichbar sind.

Der Abb. 6.12 ist zu entnehmen, daß ein Teil der in der Bildszene vorkommenden Objekte unterschiedlich klassifiziert wird. Die Unterschiede zwischen den Klassenzuweisungen hängen sowohl vom verwendeten Datenmaterial als auch von Objekt selbst ab, d.h. nicht in jedem Vergleich von Klassenkarten treten dieselben Objekte als unterschiedlich klassifiziert hervor. In allen gezeigten Vergleichen finden sich Unterschiede im Bezug zur Basisklassenkarte, die qualitativ häufigsten Unterschiede zeigen sich bei der Gegenüberstellung von 'Morgen'- und 'Mittag'-Befliegung. Zudem sind in allen Vergleichsbildern (Abb. 6.12, linke Spalte) Unterschiede aufgrund von Registrierungsunsicherheiten erkennbar, z.B. die blau und cyan-farbenen Gebiete beim Vergleich '(b) vs. (a)'. Es bleibt auch festzuhalten, daß sich für die Mehrzahl der Objekte in der Bildszene die Klassenzuweisung über die verschiedenen Datensätze nicht verändert.

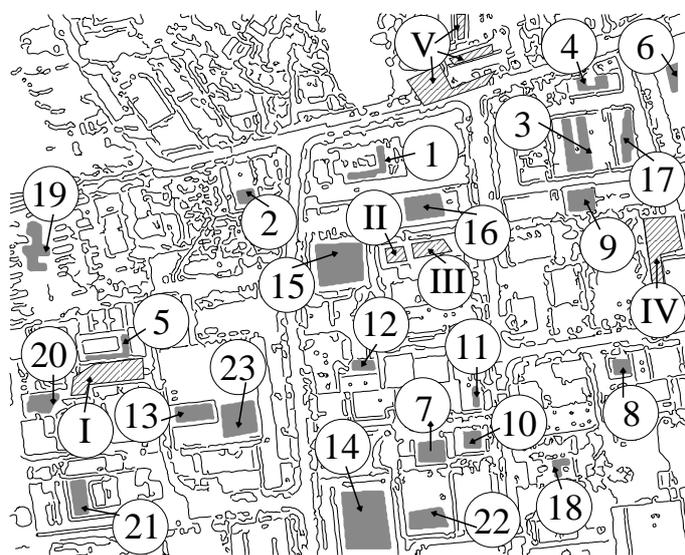


Abbildung 6.13: Illustration zur Nummerierung der Bodenpunkte für die Erstellung der mittleren Reflektanzspektren. Die mittleren Spektren der gekennzeichneten Punkte zeigen die Abbildungen 6.14 u. 6.16. Die zur jeweiligen Mittelung verwendeten Bildbereiche sind durch die grau markierten Bereiche angedeutet. Durch römische Zahlen gekennzeichnete Flächen unterliegen systematischen Unsicherheiten (siehe Text).

¹⁴Z.B. sind alle 'rot' dargestellten Flächen in der linken Abbildung '(b) vs. (a)' (obere linke Grafik) im Basisdatensatz als 'Straße / Bitumendach hell' klassifiziert worden und im Vergleichsdatensatz als 'Klasse Dach 1 / Betonflächen'.

¹⁵Es wird sowohl zwischen verschiedenen Klassen in der Basis- als auch in der Vergleichsklassenkarte unterschieden. D.h. in diesem Fall können sich bei verschiedener Klassenzuweisung Objekte einer der möglichen 11 Klassen auf je 10 verbleibende Klassen verteilen.

Abb. 6.13 zeigt eine schematische Darstellung des Gewerbegebietes sowie eine Numerierung ausgewählter Oberflächen, welche in mindestens einem der Klassenkartenvergleiche Unterschiede in der Klassifikation aufweisen. Die Abbildungen 6.14 bis 6.16 zeigen die Reflektanzspektren der verschiedenen Bodenpunkte. Ein einzelner Plot zeigt die mittleren Reflektanzen eines Bodenpunktes in Abhängigkeit vom Spektralkanal des DAEDALUS, bestimmt für die vier verschiedenen Datensätze (sofern die Oberfläche im Datensatz vorhanden). Die den Spektren jeweils zugrundeliegenden Datensätze sind mit F1, F2, F3 bzw. F4 gekennzeichnet, die Numerierung entspricht der in Abb. 6.2. Die jeweils in Klammern angegebene Zahl gibt die zur Berechnung des mittleren Spektrums verwendete Anzahl der Pixel an. Nicht dargestellt sind die Spektren der durch römische Zahlen gekennzeichneten Gebiete, welche systematischen Unsicherheiten unterliegen (z.B. Registrierungsungenauigkeiten, siehe weiter unten).

Die Fehlerbalken geben die Unsicherheiten der mittleren Spektren an. Bei den aus der 'Mittags'-Befliegung bestimmten Spektren F1–F3 wurden diese aus der Standardabweichung und der Wurzel der Pixelanzahl bestimmt. Sie bildet einen Beitrag für die Signifikanz von Unterschieden zwischen den Spektren innerhalb der Befliegung zur Mittagszeit. Zusätzlich sind noch mögliche Schwankungen in der Beleuchtung während der Aufnahmen zu berücksichtigen. [Sch98] nennt als realistische Annahme von atmosphärischen Schwankungen eine Größe von 'um 2%'. Diese Angabe deckt sich mit von uns parallel zur Befliegung durchgeführten Pyranometermessungen¹⁶, aus welchen sich mittlere relative Schwankungen¹⁷ von 1,8 % (max. 3,5 %) ergeben.

In den Fehlerbalken der aus der morgendlichen Befliegung bestimmten Spektren (F4) ist zusätzlich die absolute Unsicherheit der Reflektanzwerte (siehe Kap. 3.1.4) durch quadratische Addition berücksichtigt, weshalb die Unsicherheiten deutlich größer ausfallen. Die Angabe ist nötig, da sich die Rekalibrationskoeffizienten von 'Morgens'- und 'Mittags'-Befliegung unterscheiden (innerhalb einer Befliegung sind die Koeffizienten gleich). Man beachte, daß eine Schwankung der Spektren im Rahmen der Fehlerbalken für alle Spektren der 'Mittags'-Befliegung in gleicher Weise zu erfolgen hat (additiv / multiplikativ). Ohne Berücksichtigung der absoluten Reflektanz fallen die Unsicherheiten der mittleren Spektren vergleichbar denen der morgendlichen Befliegung aus.

¹⁶Das Pyranometer mißt die einfallende Strahlungsflußdichte [W m^{-2}] über einen Wellenlängenbereich von 350–2500 nm, eine Beschreibung des Gerätes findet sich z.B. in [Rot97]. Es wurden 1080 Messwerte in den Zeiträumen 6:58–7:03, 7:04–7:06, 7:12–7:15 u. 7:34–7:36 Uhr UT aufgenommen (morgendliche Befliegung).

¹⁷Standardabweichung der zur einfallenden Strahlungsflußdichte E_0 proportionalen Pyranometerspannungen U_{Pyr} : $E_0 \propto U_{\text{Pyr}} / \cos(\theta_i)$. Der Sonnenzenit θ_i zum Zeitpunkt der Einzelmessungen wurde mit dem Programm 'Sunposition' (vgl. Kap. 3.2) berechnet.

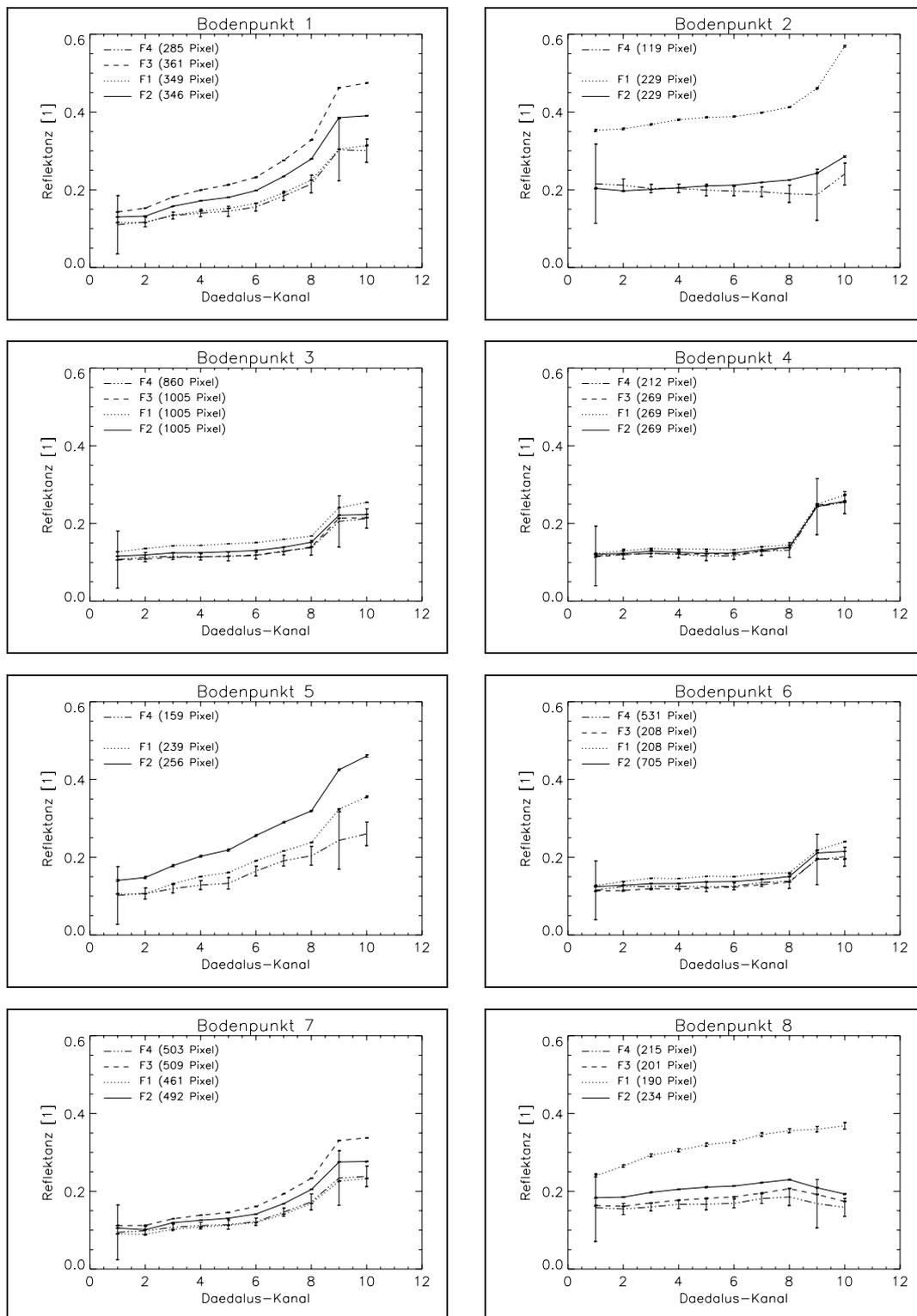


Abbildung 6.14: Mittlere Spektren verschiedener Bodenpunkte. Die Spektren eines Bodenpunktes entstammen den verschiedenen Flugstreifen (F), welche in Abb. 6.2 illustriert sind. Eine Übersicht zu der Numerierung gibt Abb. 6.13. Zu den Unsicherheiten siehe Text.

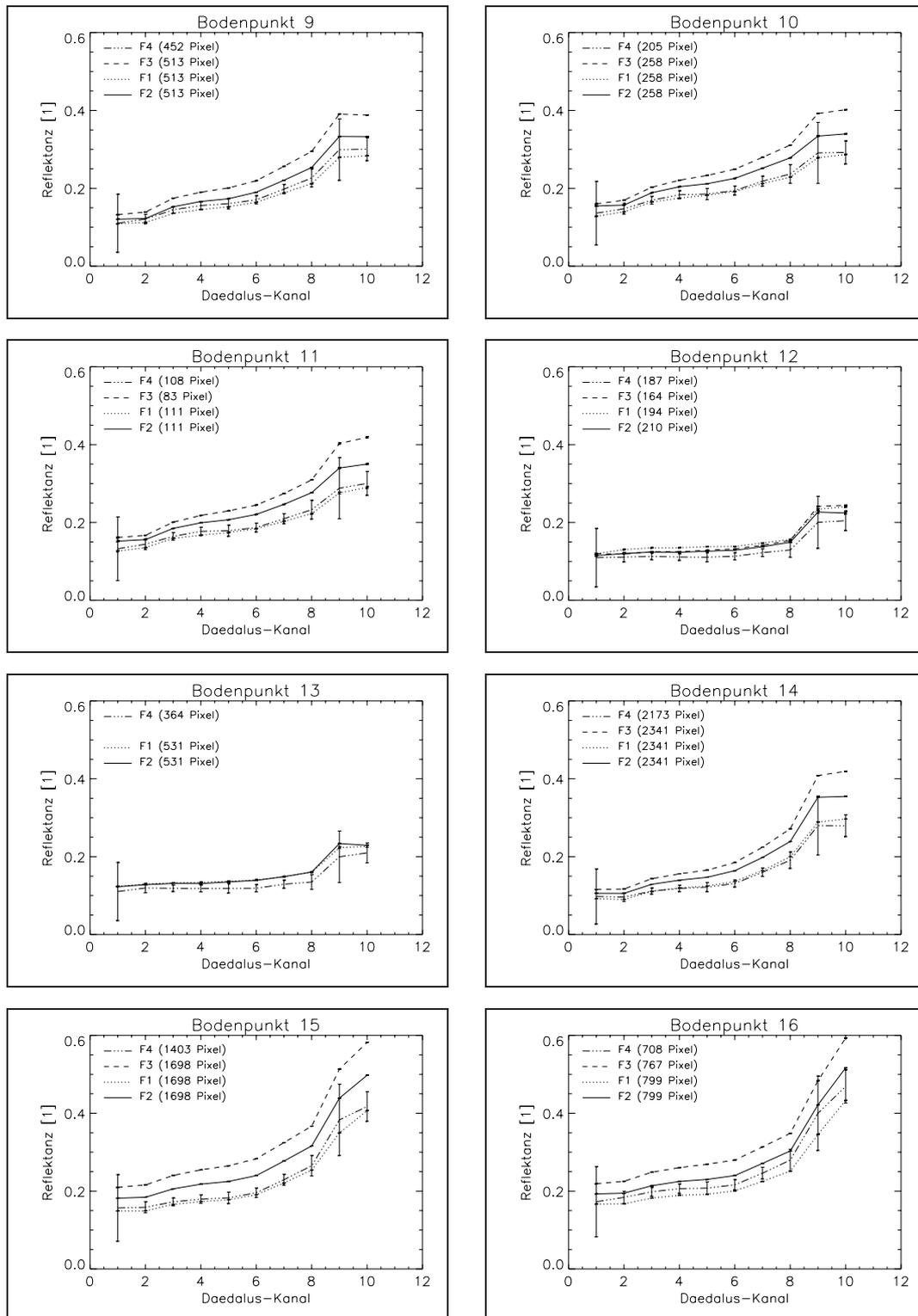


Abbildung 6.15: Mittlere Spektren verschiedener Bodenpunkte. Die Spektren eines Bodenpunktes entstammen den verschiedenen Flugstreifen (F), welche in Abb. 6.2 illustriert sind. Eine Übersicht zu der Numerierung gibt Abb. 6.13. Zu den Unsicherheiten siehe Text.

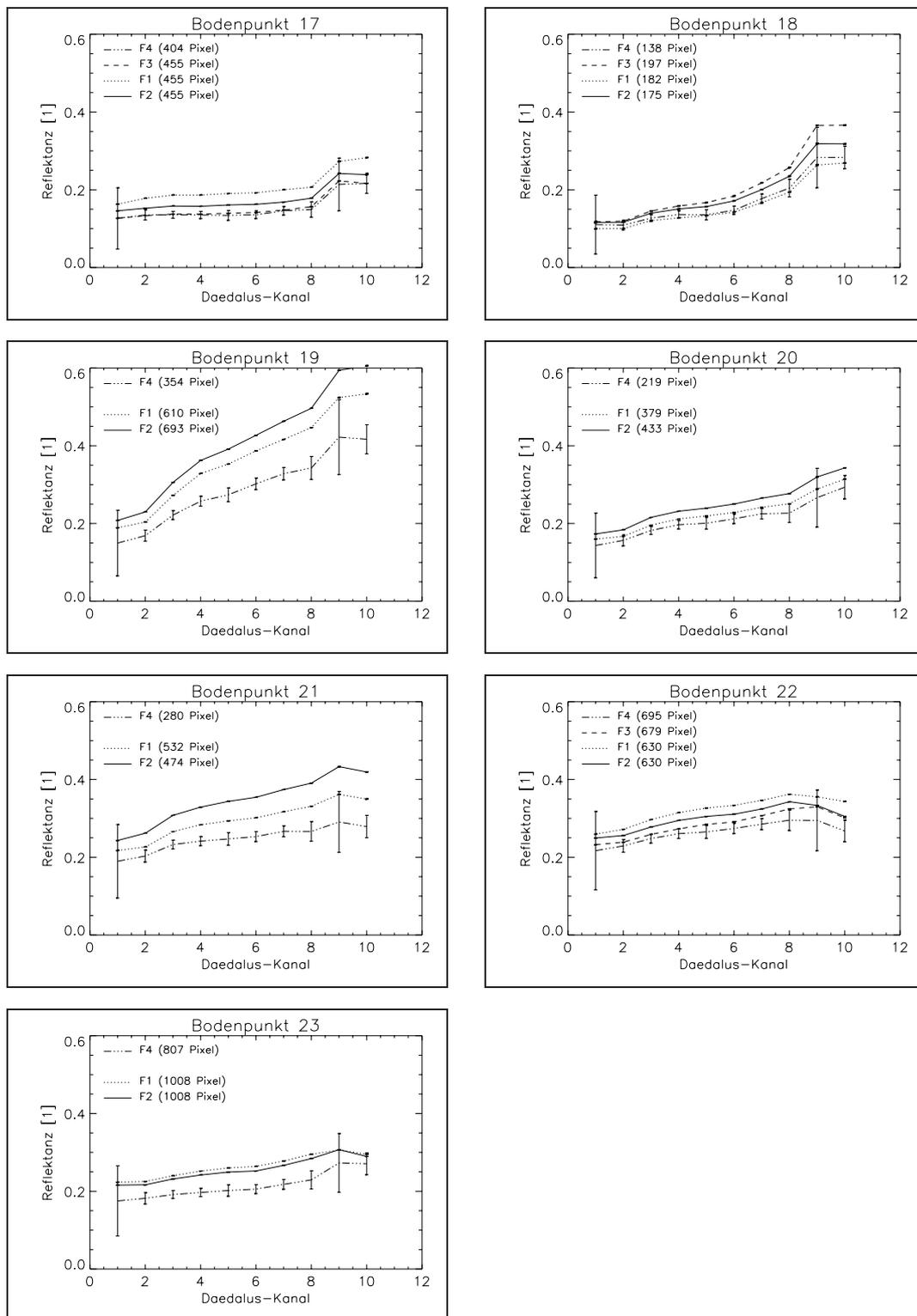


Abbildung 6.16: Mittlere Spektren verschiedener Bodenpunkte. Die Spektren eines Bodenpunktes entstammen den verschiedenen Flugstreifen (F), welche in Abb. 6.2 illustriert sind. Eine Übersicht zu der Numerierung gibt Abb. 6.13. Zu den Unsicherheiten siehe Text.

Die in den verschiedenen Datensätzen unterschiedlich klassifizierten Flächen zeigen verschieden starke Unterschiede in den Reflektanzen. Die ausgeprägtesten Unterschiede zwischen den Reflektanzspektren finden sich bei den Flächen 2, 5, 8, 19 und 21. Die weisen relative Reflektanzunterschieden von 26 – 83 % (Betragswert) zwischen Vergleichs- und Basisdatensatz auf. Dies ist deutlich oberhalb der zu erwartenden Unsicherheiten. Signifikante Unterschiede finden sich ebenfalls bei den Flächen 1, 3, 7, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17 und 18. Diese zeigen Reflektanzunterschiede von 8 – 19 % (Betragswert). Nur geringe Abweichungen in den Reflektanzwerten zeigen sich bei den Flächen 4, 6, 12, 13, 20, 22 und 23. Deren Reflektanzunterschiede sind als nicht signifikant verschieden anzusehen. Es finden sich für die Flächen zwar Reflektanzunterschiede bis zu relativ 18 %, diese entstammen aber den Daten der Morgen- und Mittags-Befliegung. Ein Großteil der gezeigten Spektren der Mittags-Befliegung läßt sich bei Berücksichtigung der Unsicherheiten der absoluten Reflektanzwerte mit den Spektren des Basisdatensatzes in Übereinstimmung bringen. Ausnahmen bilden die Spektren der Flächen 5, 19 und 21. Diese unterscheiden sich auch bei Berücksichtigung der systematischen Unsicherheiten signifikant von den Spektren des Basisdatensatzes. Man beachte, daß bei den gewählten Flächen die stärksten Reflektanzunterschiede nicht notwendigerweise zwischen dem hier gewählten Basisdatensatz und den jeweiligen Vergleichsdatsätzen zu finden sind. So zeigen z.B. die Spektren der Flächen 1, 8, 10, 15 und 17 in den Datensätzen F1 und F3 einen größeren Unterschied zueinander als jeweils zum Spektrum des Basisdatensatzes.

Die angezeigten Unterschiede für die durch römische Zahlen gekennzeichneten Flächen sind auf systematische Unsicherheiten zurückzuführen. Die Bereiche I) u. IV) liegen während der morgendlichen Befliegung im Schatten, wurden aber durch den Schattenfilter nicht erkannt (vgl. Abb. 6.11 u. Abb. 6.4). Während der Mittags-Befliegung sind beide Bereiche auch durch direktes Sonnenlicht beleuchtet, die gefundenen Unterschiede sind durch die verschiedene Beleuchtung verständlich. Bei den mit II) u. III) gekennzeichneten Flächen handelt es sich um geneigte Dachflächen. Die angezeigten Unterschiede zwischen den Klassenkarten der 'Morgen'- und 'Mittag'-Befliegung sind auf die verschiedenen Abweichungen von der angenommenen Beleuchtung zurückzuführen. Für die Fläche III) wird zudem ein Unterschied innerhalb der Befliegungen zur Mittagszeit (vgl. Abb. 6.12, '(a) vs. (b)') gefunden. Eine der beiden Dachhälften wird anstelle der Klasse 'Dach5' der Klasse 'Fassade' zugewiesen. Bei großen Wellenlängen erscheint sie in Vorwärtsstreurichtung (Datensatz '1' in Abb. 6.2) heller als in Nadirrichtung (Datensatz '2' in Abb. 6.2). Möglicherweise handelt es sich dabei um einen BRDF-Effekt, aufgrund der Dachorientierung wäre für die hellere Dachhälfte Spiegelung denkbar. Die genaue Ursache bleibt aufgrund fehlender Detailkenntnisse unklar. In dem mit V) bezeichneten Bereich sind die angezeigten Unterschiede ebenfalls auf die o.g. Unsicherheiten zurückzuführen.

Die Tabellen 6.1 und 6.2 zeigen nochmals eine tabellarische Gegenüberstellung der Reflektanzwerte der verschiedenen Datensätze. Der Übersicht halber wurden die Reflektanzwerte beider Tabellen über die Bänder 1–8 des DAEDALUS-Sensors gemittelt. Tabelle 6.1 beschränkt sich auf die Daten, zwischen denen sich die Klassenzuweisung einzelner Flächen unterscheidet. Dargestellt ist der mittlere Reflektanzwert $\rho(F2)$ des Basisdatensatzes und der Unterschied $\Delta\rho = \rho(F2) - \rho(Fx)$ zum entsprechenden Wert im Vergleichsdatsatz Fx ,

Nr.	Flugstreifen F2 vs. Fx	Reflektanz $\rho(F2)$ Bd. 2–8	Differenz $\Delta\rho$ $\rho(F2) - \rho(Fx)$	$\Delta\rho$ [%]
1	2 vs. 1	0.193	0.032	16.5
1	2 vs. 4	0.193	0.038	19.4
2	2 vs. 1	0.210	-0.174	-83.1
2	2 vs. 4	0.210	0.010	4.8
3	2 vs. 1	0.131	-0.019	-14.2
4	2 vs. 1	0.128	-0.008	-5.9
5	2 vs. 1	0.230	0.060	25.9
5	2 vs. 4	0.230	0.081	35.1
6	2 vs. 1	0.137	-0.013	-9.2
7	2 vs. 1	0.141	0.021	15.1
7	2 vs. 4	0.141	0.017	12.0
8	2 vs. 1	0.209	-0.107	-51.2
9	2 vs. 1	0.183	0.024	13.2
9	2 vs. 4	0.183	0.015	7.9
10	2 vs. 1	0.217	0.032	14.7
10	2 vs. 4	0.217	0.026	12.0
11	2 vs. 1	0.213	0.035	16.4
11	2 vs. 4	0.213	0.028	13.2
12	2 vs. 1	0.130	-0.010	-7.7
13	2 vs. 1	0.139	-0.001	-1.0
13	2 vs. 4	0.139	0.016	11.8
14	2 vs. 3	0.160	-0.020	-12.5
15	2 vs. 3	0.237	-0.041	-17.1
15	2 vs. 4	0.237	0.040	17.0
16	2 vs. 3	0.240	-0.038	-15.9
16	2 vs. 4	0.240	0.020	8.3
17	2 vs. 3	0.163	0.021	12.7
17	2 vs. 4	0.163	0.024	14.7
18	2 vs. 1	0.167	0.027	15.8
19	2 vs. 4	0.382	0.112	29.2
20	2 vs. 4	0.237	0.038	15.8
21	2 vs. 4	0.337	0.093	27.5
22	2 vs. 4	0.302	0.0362	12.0
23	2 vs. 4	0.249	0.045	18.2

Tabelle 6.1: Reflektanzen in verschiedenen Flugstreifen. Die Tabelle zeigt die Unterschiede der mittleren Reflektanz verschiedener Bodenpunkte in Bezug zum Reflektanzwert des Basisdatensatzes F2. Die Numerierung entspricht der Kennzeichnung in Abb. 6.13. Für die dargestellten Kombinationen von Flugstreifen finden sich Unterschiede in der Klassifikation zwischen Basis- und Vergleichsdatensatz, vgl. Abb. 6.12.

$x = 1, 3$ oder 4 . Tabelle 6.2 stellt die Reflektanzwerte der Bodenpunkte aller Datensätze gegenüber. Reflektanzwerte mit verschiedener Klassenzuweisung gegenüber dem Basisdatensatz sind fett dargestellt. Aus der Tabelle ist zudem der jeweilige Beobachtungszenitwinkel $\theta_r(Fx)$ im Datensatz Fx ersichtlich. Für die Daten der Mittags-Befliegung (F1–F3) korrespondieren negative Winkel zur Streuung in Rückwärtsrichtung, positive

Winkel korrespondieren zur Streuung in Vorwärtsrichtung. Bei den Daten der Morgen-Befliegung wurde sowohl bei positiven als auch bei negativen Winkeln in etwa senkrecht zur Hauptebene beobachtet. Die angegebenen Unsicherheiten der Reflektanzwerte geben den Fehler des mittleren Reflektanzspektrums an. Systematische Unsicherheiten von relativ 2 % sind beim Vergleich der Daten F1–F3 zusätzlich zu berücksichtigen. Bei den Daten der Morgen-Befliegung ist von einer systematischen Unsicherheit aller Daten von absolut 0,007 sowie relativ 3 % auszugehen.

Nr.	$\theta_r(\text{F1})$ [°]	$\theta_r(\text{F2})$ [°]	$\theta_r(\text{F3})$ [°]	$\theta_r(\text{F4})$ [°]	$\rho(\text{F1})$ [1]	$\rho(\text{F2})$ [1]	$\rho(\text{F3})$ [1]	$\rho(\text{F4})$ [1]
1	18	-14	-37	-11	0.1615 ± 0.0006	0.1934 ± 0.0007	0.2261 ± 0.0008	0.1559 ± 0.0007
2	5	-26	-	-23	0.3844 ± 0.0016	0.2100 ± 0.0006	-	0.1999 ± 0.0010
3	36	7	-20	10	0.1497 ± 0.0004	0.1311 ± 0.0003	0.1199 ± 0.0002	0.1205 ± 0.0003
4	37	8	-19	12	0.1359 ± 0.0005	0.1283 ± 0.0004	0.1249 ± 0.0004	0.1227 ± 0.0007
5	-10	-36	-	-36	0.1706 ± 0.0009	0.2303 ± 0.0020	-	0.1495 ± 0.0028
6	42	18	-10	21	0.1497 ± 0.0004	0.1371 ± 0.0002	0.1231 ± 0.0004	0.1282 ± 0.0002
7	22	-8	-32	-8	0.1201 ± 0.0005	0.1415 ± 0.0005	0.1590 ± 0.0005	0.1245 ± 0.0005
8	38	11	-16	12	0.3160 ± 0.0041	0.2090 ± 0.0011	0.1826 ± 0.0009	0.1690 ± 0.0015
9	36	7	-20	9	0.1587 ± 0.0005	0.1827 ± 0.0006	0.2108 ± 0.0007	0.1682 ± 0.0005
10	27	-4	-29	-4	0.1850 ± 0.0007	0.2167 ± 0.0009	0.2380 ± 0.0008	0.1908 ± 0.0008
11	26	-5	-30	-4	0.1781 ± 0.0009	0.2130 ± 0.0009	0.2350 ± 0.0007	0.1849 ± 0.0010
12	16	-15	-37	-15	0.1401 ± 0.0009	0.1300 ± 0.0007	0.1321 ± 0.0005	0.1159 ± 0.0007
13	-2	-30	-	-30	0.1404 ± 0.0011	0.1391 ± 0.0003	-	0.1226 ± 0.0005
14	16	-15	-37	-16	0.1351 ± 0.0002	0.1603 ± 0.0002	0.1803 ± 0.0002	0.1329 ± 0.0002
15	14	-18	-39	-16	0.1903 ± 0.0003	0.2380 ± 0.0004	0.2787 ± 0.0004	0.1976 ± 0.0013
16	22	-10	-33	-7	0.2011 ± 0.0004	0.2397 ± 0.0005	0.2779 ± 0.0006	0.2197 ± 0.0020
17	39	12	-15	14	0.1915 ± 0.0006	0.1627 ± 0.0005	0.1420 ± 0.0003	0.1388 ± 0.0008
18	33	5	-22	4	0.1408 ± 0.0008	0.1673 ± 0.0010	0.1784 ± 0.0010	0.1482 ± 0.0010
19	-18	-41	-	-39	0.3440 ± 0.0006	0.3823 ± 0.0006	-	0.2708 ± 0.0012
20	-18	-40	-	-40	0.2165 ± 0.0005	0.2376 ± 0.0004	-	0.2001 ± 0.0011
21	-14	-38	-	-38	0.2885 ± 0.0004	0.3374 ± 0.0003	-	0.2444 ± 0.0006
22	22	-9	-32	-9	0.3218 ± 0.0005	0.3016 ± 0.0004	0.2825 ± 0.0003	0.2654 ± 0.0006
23	3	-26	-	-26	0.2592 ± 0.0004	0.2490 ± 0.0003	-	0.2036 ± 0.0006

Tabelle 6.2: Mittlere Reflektanzen ρ in den verschiedenen Datensätzen F1, F2, F3 und F4. Für die fett hervorgehobenen Reflektanzwerte ergeben sich Unterschiede in der Klassifikation zwischen Basis- (F2) und Vergleichsdatsatz, vgl. Abb. 6.12. Die Numerierung entspricht der Kennzeichnung in Abb. 6.13, die Mittelung erfolgte zudem über die DAEDALUS-Kanäle 2–8. Für die Daten der Mittags-Befliegung (F1–F3) korrespondieren negative bzw. positive Beobachtungswinkel $\theta_r(\text{F}_x)$ zur Streuung in Rückwärts- bzw. Vorwärtsrichtung. Bei den Daten der Morgen-Befliegung (F4) wurde sowohl bei positiven als auch bei negativen Winkeln in etwa senkrecht zur Hauptebene beobachtet.

6.1.6 Folgerung und Ausblick

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß BRDF-Effekte die Klassifikation beeinflussen können. Es zeigt sich, daß sowohl bei 'gleichen Beobachtungsrichtungen und verschiedenen Sonnenständen' als auch bei 'verschiedenen Beobachtungsrichtungen und gleichen Sonnenständen' signifikante BRDF-Effekte bei städtischen Oberflächen auftreten können. Die festgestellten Reflektanzunterschiede liegen dabei größtenteils zwischen relativ 10–20 %, in Extremfällen finden sich auch Unterschiede von bis zu relativ 80 %. In der gezeigten Bildszene finden sich BRDF-Effekte insbesondere bei Kies- und Asphaltgedächern. Die Kiesdächer¹⁸ zeigen dabei ein erhöhtes Streuverhalten in Rückstreurichtung. Bei Asphaltgedächern¹⁹ finden sich Anstiege der Reflexion gegenüber der Nadir-Richtung sowohl in Vorwärts als auch in Rückstreurichtung. Der augenfälligste BRDF-Effekt findet sich bei einem Metalldach.

Diese winkelabhängige Reflexion kann als zusätzliche Information für Klassifikationsaufgaben genutzt werden. Prinzipiell können dazu sowohl Daten eines Zeilenscanners als auch Daten eines Satelliten, z.B. dem IKONOS, verwendet werden. Bei der Verwendung eines Zeilenscanners sind entweder mehrere parallel versetzte Überflüge einer Bildszene notwendig oder zwei möglichst gleiche Überflüge (gleiche Flugbahnen) einer Szene mit stark unterschiedlichen Sonnenständen (Tageszeiten). Die Datensätze sollten zudem Messungen nahe der Hauptebene beinhalten, um signifikante BRDF-Effekte zu erfassen. Bei Satellitenbildern kann auf die beiden Datensätze einer Stereoaufnahme zurückgegriffen werden.

Die Berücksichtigung der BRDF-Effekte bei der Klassifikation kann in Anlehnung an die hier durchgeführte Untersuchung stattfinden. Diese ist dann als eine dem Nutzer zusätzlich gegebene Information zu sehen, welche dieser zu interpretieren hat. Eine weitergehende Nutzung von BRDF-Effekten sollte durch Verwendung eines Merkmalsraumes erreicht werden, welcher die BRDF-Effekte selbst als Merkmal M wiedergibt.

Bei zwei verschiedenen Datensätzen, Reflektanzbilder B_1 u. B_2 , derselben Bildszene kann ein solches Merkmalsbild M z.B. der relative Unterschied sein:

$$M(x, y, j) = \frac{B_1(x, y, j) - B_2(x, y, j)}{B_1(x, y, j) + B_2(x, y, j)} \quad , \text{ für jeden Bildpunkt } (x, y) \quad (6.2) \\ \text{im Spektralband } j.$$

Das so entstandene Merkmalsbild ist frei vom spektralen Rückstrahlvermögen (Reflektanzspektrum) der Oberfläche und gibt die (ggf. spektralen) relativen Änderungen in der Reflektanz in Abhängigkeit der Einfalls- und / oder Beobachtungswinkel wieder²⁰. In-

¹⁸Anhand von Vorort-Beobachtungen sowie hochaufgelösten Luftphotos wissen wir, daß es sich bei den Flächen 1, 5, 9, 10, 11, 14 und 21 um Dächflächen handelt, auf denen eine Kiesschüttung aufgebracht wurde.

¹⁹Bei den Flächen 3,4,7 und 12 handelt es sich um Dächer mit aufgetragenen Bitumenbahnen. Inwieweit es sich um ähnliches Material (ohne oder mit viel/wenig Quarz) handelt, konnte anhand der Vorort-Begehungen nicht festgestellt werden. Anhand des Vergleichs der Reflektanzwerte der Flächen 3 und 4 bei gleichen Winkelstellungen sind die Dachbedeckungen verschieden.

²⁰Würden sich alle Oberflächen wie Lambertstrahler verhalten, so ergäbe sich für jeden Bildpunkt $M(x, y, j) = 0$ (Idealvorstellung), d.h. aus der Verwendung zweier Aufnahmen ergäbe sich durch eine

wieweit sich nach Gl. 6.2 einzelne Oberflächen unterscheiden lassen, bedarf der weiteren Forschung und kann anhand des vorliegenden Datenmaterials nicht eingehender untersucht werden. Für einen direkten Vergleich von Unterschieden in der winkelabhängigen Reflexion verschiedener Oberflächen ist es notwendig, daß die Winkelstützstellen innerhalb der Datensätze möglichst ähnlich sind. Aufnahmen des DAEDALUS-Scanners (oder eines vergleichbaren Zeilenscanners) eignen sich kaum für die Erzeugung eines geeigneten Merkmalsraumes, da bereits der Beobachtungswinkel innerhalb eines Flugstreifens variiert und dadurch bei Verwendung zweier Flugstreifen eine Vielzahl verschiedener Winkelkombinationen vorliegt. Für eine derartige Untersuchung sollte auf Satellitenbilder mit Stereoaufnahme zurückgegriffen werden, denn die größere Entfernung des Satellitensensors zur Erdoberfläche liefert ähnliche Beobachtungswinkel innerhalb einer Bildszene.

Generell ist bei der Verwendung eines Merkmalsraumes ähnlich zu Gl. 6.2 zu bedenken, daß nicht der gesamte Bildinhalt des Merkmalsbildes M dem Sinne nach gehaltvolle Merkmale beinhaltet. Je nach Aufnahmebedingung und Bildinhalt des zur Erstellung des Merkmalsbildes verwendeten Datenmaterials kann das verschiedene Ursachen haben.

1. Stellen verschiedene Sonnenstände die Basis für den zu bildenden Merkmalsraum dar, so ändern sich die Schattenwürfe zwischen den Bildszenen. Das Merkmalsbild beinhaltet dadurch für einen Teil der Bildpunkte anstelle der winkelabhängigen Änderung der Reflektanz die Änderung aufgrund der verschiedenen Beleuchtung (Himmelslicht und Sonnenlicht bzw. nur Himmelslicht). Außerdem sind in diesem Fall geneigte Flächen von der Betrachtung auszunehmen, da diese bei der Bestimmung der Reflektanzbilder als eben liegend angenommen werden und deren Reflektanzwerte dadurch über- oder unterschätzt werden²¹.
2. Stellen verschiedene Beobachtungswinkel die Basis für den zu bildenden Merkmalsraum dar, so werden aufgrund der verschiedenen Projektion unterschiedliche Bereiche der Bildszene verdeckt oder sichtbar (z.B. Fassaden). Für diese Bildbereiche gibt es zwischen den Eingabedaten keine korrespondierenden Bildpunkte und es kann somit auch keine Änderung der Reflektanz bestimmt werden (durch die verwendete Transformationsfunktion in der Registrierung existiert allerdings ein 'korrespondierender' Bildpunkt).

Datenmaterial mit einer Variation im Beobachtungswinkel kann mit relativ kleinem Zeitversatz gemessen werden²², wodurch die Position der Sonne als konstant angenommen werden kann. Dadurch kann auch die Fehlbestimmung der Reflektanz bei

Klassifikation keine zusätzliche Information.

²¹Durch die Annahme ebener Flächen sind z.B. Spitzdächer auch noch als solche durch eine helle und dunkle (Teil-)Dachfläche in Reflektanzbildern zu erkennen und nur schwer bzw. gar nicht durch *ein* repräsentatives Reflektanzspektrum zu klassifizieren. Eine Verbesserung im Klassifikationsergebnis von Reflektanzbildern läßt sich in einem solchen Fall zwar durch Helligkeits-Normierung und Änderungen am spektralen Verlauf der Spektren schaffen [Wie98], der für uns relevante Unterschied geht dabei allerdings verloren.

²²Bei Verwendung des flugzeuggetragenen DAEDALUS-Sensors kann ein erneuter Überflug innerhalb einiger Minuten realisiert werden, eine Abschätzung aus uns vom IKONOS vorliegendem Datenmaterial ergibt für einen vollen Schwenk in der Bahnebene ($\pm 45^\circ$) eine Zeitdauer von etwa 70 Sekunden.

geneigten Flächen als konstant angenommen werden und erlaubt eine Bewertung im Sinne von Gl.6.2. Zu beachten bleibt, daß in der Regel sowohl Beleuchtungs- als auch Beobachtungswinkel zwischen den beiden Dachhälften eines Spitzdaches verschieden sind (bezogen auf die Flächennormalen der einzelnen Dachhälften). D.h., für Dachhälften eines Giebeldaches resultiert nicht notwendigerweise ein ähnliches Merkmal nach Gl.6.2.

3. Generell treten bei der Registrierung von Bilddaten Ungenauigkeiten auf. Bei der Klassifikation eines nach Gl. 6.2 erstellen Merkmalbildes muß diesen Ungenauigkeiten Rechnung getragen werden, ebenso bei der Bewertung der aus der Klassifikation erhaltenen Ergebnisse. Die zu untersuchenden Bildinhalte sollten daher eine entsprechende homogene, hohe räumliche Ausdehnung im Bezug auf die Registrierungsgenauigkeit besitzen. Zudem sollte vor der Klassifikation eine Mittelung des Merkmalbildes mit entsprechender Fenstergröße stattfinden.
4. Durch den in der Regel vorhandenen Zeitunterschied zwischen den Aufnahmen kann sich der Bildinhalt in Teilen geändert haben, z.B. sich bewegende Fahrzeuge in städtischen Bildszenen. Für diese gibt das nach Gl. 6.2 erstellte Merkmalbild den Unterschied zwischen verschiedenen Reflektanzflächen wieder und nicht den Reflektanzunterschied der selben Oberfläche.

Abhängig von dem verwendeten Datenmaterial zur Erstellung des Merkmalbildes sind dann die o.g. Bildbereiche von der Bewertung auszuschließen.

7 Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht das winkelabhängige Reflexionsverhalten von rauhen städtischen Oberflächen. Dessen Kenntnis ist für Anwendungen in der Fernerkundung ebenso von Interesse wie in der Informatik in den Bereichen des Bildverstehens (engl. *Computer Vision*). Die Arbeit zeigt anhand von Labormessungen neue Einblicke in das Reflexionsverhalten städtischer Oberflächen in Abhängigkeit von der Polarisation der einfallenden Strahlung. Ein weiterer Teil der Arbeit bestimmt die Genauigkeit von Reflektanzbildern städtischer Gebiete bei Verwendung des Multispektral-Sensors DAEDALUS AADS 1268. Diese werden zur Untersuchung von Unterschieden in der Klassifikation im Hinblick auf hochauflösende Satellitenbilder verwendet.

In einer Meßkampagne an der European Goniometric Facility (EGO) des Joint Research Center, Ispra, Italien, wurde die bidirektionale Reflexionsfunktion BRDF (engl. *bidirectional reflectance distribution function*) von künstlichen Oberflächen gemessen. Ein linear polarisiertes HeNe-Laser diente als Lichtquelle, als Proben-Flächen wurden eine Spectralonfläche, eine rote Dachziegel sowie eine mit Quarz bestreuten Dachpappe verwendet. Die Messungen wurden bei horizontaler (s) und vertikaler (p) Polarisation der einfallenden Strahlung durchgeführt. Das gestreute Licht wurde sowohl parallel (*like*-Polarisation) als auch senkrecht (*cross*-Polarisation) zur Orientierung der Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung gemessen.

Die Messungen stellen die erste eingehende Verwendung von Laserlicht am EGO Goniometer dar. Auf die in dieser Arbeit durchgeführte Fehlerbetrachtung kann für zukünftige Messungen am EGO zurückgegriffen werden. Bei Verwendung des SE 590 Detektors sollte der Betriebsmodus der detektorinternen Mittelung verwendet werden, wodurch der Beitrag des Detektorrauschens für den Großteil potentieller Probenflächen vernachlässigbar ist. Die verbleibende relative Unsicherheit bei der Bestimmung von BRDF-Werten aus Messungen bei Laserlicht beträgt dann etwa 4,3%.

Zur Beschreibung der Messungen wurde das BRDF Modell von [TS67] verwendet, wobei die Anteile der *cross*-Polarisation als Lambertsch angenommen wurden. Das Modell gibt die charakteristischen Merkmale in der Reflexion der Proben 'Spectralon' und 'Rote Dachziegel' wieder. Jedoch wird der χ^2 -Test abgelehnt, weil das Modell Abweichungen in der Beschreibung der Streuung in Rückstreurichtung aufweist. Bei der Probe 'Rote Dachziegel' finden sich auch Abweichungen in der Beschreibung des Spiegelungspeaks, insbesondere bei extrem großen Einfallswinkeln. Die charakteristischen Merkmale in der Reflexion bei gleicher Orientierung der Polarisationsrichtung (*like*-Polarisation) von Quelle und Detektor sind:

- a) eine Zunahme der Streuung mit zunehmendem Beobachtungszenitwinkel θ_r in Vorwärtsstreureichtung,
- b) ein Zunahme der Streuung in Vorwärtsstreureichtung mit zunehmendem Einfallswinkel θ_i und
- c) unterschiedlich ausgeprägtes Spiegelungsverhalten in Abhängigkeit von der Polarisierung der einfallenden Strahlung.

Bei verschiedener Orientierung der Polarisationsrichtung von Quelle und Detektor (*cross*-Polarisation) können beide Proben als Lambertsch angesehen werden.

Die Probe 'Bestreute Dachpappe' zeigt neben einem erhöhten Streuverhalten in Vorwärtsstreureichtung auch ein erhöhtes Streuverhalten in Rückstreureichtung. Bei *like*-Polarisation kann dieses erst durch die Wahl einer anderen als der allgemein im Modell angenommenen Verteilung der Oberflächenelemente beschrieben werden. Bei *cross*-Polarisation findet sich bei der Probe 'Bestreute Dachpappe' ebenfalls ein erhöhtes Streuverhalten in Vorwärts- und Rückwärtsstreureichtung. Dieses kann durch das Modell nicht beschrieben werden und ist nicht allein durch die Probenstruktur (Asphalt/Quarz) erklärbar. Plausibel sind z.B. durch das Modell nicht berücksichtigte Zwei- und Dreifach-Spiegelungen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Im Gegensatz zu den in [Mei00] durchgeführten Messungen ergibt sich durch die Verwendung von polarisiertem Licht eine genauere Bestimmung der Modellparameter für die Stärke der Spiegelungsintensität und des komplexen Brechungsindex \hat{m} . Hierbei zeigt sich, daß sich die zur Beschreibung der Streuung von unpolarisiertem Licht gebräuchliche Annahme eines reellen Brechungsindex weniger gut zur Beschreibung der vorliegenden Messungen eignet. Eine adäquate Modellbeschreibung des Reflexionsverhaltens bei *like*-Polarisation wird erst durch die Verwendung eines komplexen Brechungsindex erreicht.

Die aus Messungen in der Hauptebene bestimmten Modellparameter vermochten das Streuverhalten der beiden Proben 'Spectralon' und 'Rote Dachziegel' auch außerhalb der Hauptebene zu beschreiben. Die für eine einzelne Probe mit dem Modell berechneten Gesamtalbedos für *s*- und *p*-Polarisation stimmen überein. Die Gesamtalbedo ist sowohl für 'Spectralon' als auch für die 'Rote Dachziegel' unabhängig von der Polarisierung der einfallenden Strahlung, wobei die zur Gesamtalbedo beitragenden Teilalbedos eine von der Polarisationsrichtung abhängige Größe besitzen. Die Teilbeiträge basieren im Sinne der Modellannahmen auf einfach spiegelnder Reflexion sowie Mehrfachstreuungen im Probenvolumen.

In den Jahren 1994, 1995 und 1997 wurden in der Arbeitsgruppe drei Befliegungskampagnen des nördlichen Stadtgebiets von Nürnberg mit dem flugzeuggestützten Zeilenscanner DAEDALUS AADS 1268 durchgeführt¹. Die gewonnenen Daten wurden in dieser Arbeit durch einen vergleichbaren Prozessierungsverlauf in *Reflektanzwerte* überführt, wobei auf Arbeiten von [Hep94] und [Kol96] zur grundlegenden Bestimmung von Reflektanzbildern zurückgegriffen wurde. Es wurden einzelne *Fehlerquellen* in den Meß- und Auswerteschritten sowie Unsicherheiten in der Atmosphärensimulation bestimmt. Es zeigte sich, daß

¹Betrieben durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen.

abhängig von Tageszeit und Flughöhe die durch das Detektorrauschen des DAEDALUS Sensors bedingte relative Unsicherheit der Reflektanzen 1,3 % beträgt, gemittelt über alle Kanäle (ohne den Thermalkanal) und Reflektanzwerte von 10, 30 und 60 %. Die größten Unsicherheiten finden sich dabei in den Kanälen 1 und 9, welche in Extremfällen mehr als relativ 10 % betragen können. Dies betrifft insbesondere Flächen niedriger Reflektanz wie Asphalt- und Wasserflächen. Relative Unsicherheiten in der Reflektanz bedingt durch das Atmosphärenmodell wurden durch Variation von Modellparametern zu etwa 3 bis 6 % bestimmt. Die Unsicherheit verringert sich tendenziell mit zunehmender Wellenlänge, Bereiche mit starker atmosphärischer Absorption sind davon auszunehmen.

Parallel zu den jeweiligen Befliegungen wurden an ausgewählten Bodenpunkten Reflektanzmessungen mit einem Bodenspektrometer durchgeführt. Aus diesen wurden zu den DAEDALUS-Daten korrespondierende Reflektanzspektren bestimmt und ein Vergleich durchgeführt. Dabei zeigten sich in allen drei Jahren signifikante Unterschiede zwischen den aus den Bodenmessungen bestimmten Reflektanzspektren und den DAEDALUS-Reflektanzen. Die Abweichungen sind sowohl zwischen den einzelnen Befliegungskampagnen als auch zwischen den einzelnen Spektralkanälen während eines Jahres unterschiedlich. Für die Kampagne 1994 zeigt der Vergleich eine Übereinstimmung der Spektren bei hohen und niedrigen Wellenlängenbereichen, für die Spektralkanäle 3 bis 8 (Wellenlängen zwischen 0,5–1,05 μm) liegen die DAEDALUS-Reflektanzen höher als die Reflektanzwerte der Bodenmessungen. Bezogen auf die Bodenmessungen sind relative Abweichungen zwischen 13 bis max. 43 % feststellbar (25 % im Mittel). Die Kampagne 1995 zeigt die relativ beste Übereinstimmung zwischen den Spektralkanälen 1–8 mit mittleren relativen Unterschieden von 7 %. Im Nahen Infrarot liegen die DAEDALUS-Reflektanzen um relativ 25 % unterhalb der Bodenmessungen. Ähnlich im Vergleich zur Kampagne 1995 zeigen sich die Abweichungen zwischen den DAEDALUS- und Bodenreflektanzen für die Kampagne 1997, wobei die aus den DAEDALUS-Daten gewonnenen Reflektanzen für alle Kanäle unterhalb der Reflektanzspektren der Bodenmessungen liegen. Bei der morgens durchgeführten Befliegung betragen die relativen Unterschiede im Mittel knapp 9 % für die Kanäle 1–8 und 34 % für die Kanäle 9–10. Diese vergrößern sich bei der mittags durchgeführten Befliegung auf 18 % für die Kanäle 1–8 und 39 % für die Kanäle 9–10. Davon ausgehend, daß sich Detektoreigenschaften des DAEDALUS nicht zwischen den beiden Befliegungen geändert haben, müssen die verschiedenen Abweichungen als Indiz für eine zu beiden Zeitpunkten nicht ausreichende Atmosphärenbeschreibung angesehen werden (die relative Standardabweichung der Bodenmessungen beträgt für die Beton- und Asphaltflächen weniger als 3 %). Die gemessenen Bodenspektren zeigen im Vergleich über die Jahre eine deutlich bessere Übereinstimmung, wobei die 1997 gewonnenen Spektren der beiden Asphaltflächen um 1–3 Reflektanzprozent höhere Reflektanzwerte als in den Vorjahren aufweisen. Dieser Umstand ist durch eine zeitliche Veränderung (Aufhellung durch Alterung) von Asphaltflächen plausibel.

In Anbetracht der größeren systematischen Unsicherheiten seitens der DAEDALUS-Reflektanzen wurden die DAEDALUS-Reflektanzwerte durch eine lineare Transformation auf die IRIS-Messungen umgerechnet. Die daraus resultierende Unsicherheit der Reflektanzwerte setzt sich aus einem additiven sowie einem multiplikativen Anteil zusammen.

Der additive Anteil beträgt für die bei 300 m durchgeführten Befliegungen im Mittel absolut 0,4 Reflektanzprozent in den DAEDALUS-Bändern 2–8 und 1,1 Reflektanzprozent in den Bändern 9–10. Die multiplikative Unsicherheit wurde im Mittel zu relativ 3 % (Bänder 2–8) bzw. 7 % (Bänder 9–10) bestimmt. Für die im untersuchten Bildmaterial vorkommenden Bildinhalte (Flughafen, Wohngebiete, Agrarflächen oder Parkanlagen) entspricht dies mittleren relativen Unsicherheiten in der absoluten Reflektanz zwischen 7–16 % in den DAEDALUS-Bändern 2–8. Im Nahen Infrarot (Bänder 9–10) betragen die Unsicherheiten zwischen relativ 15–20 %. Im Band 1 liegen die mittleren Unsicherheiten typischerweise oberhalb von relativ 30 % (bei Parkanlagen bis zu 55 %). Zurückzuführen ist dies zum einen auf ein im Gegensatz zu den anderen Bändern des DAEDALUS deutlich erhöhtes Detektorrauschen, zum anderen auf niedrige absolute Reflektanzwerte im blauen Spektralbereich ($\bar{\rho}(\text{Band1}) < 0,08$ für Agrarflächen und Parkanlagen).

In den Reflektanzbildern von 1997 wurden BRDF-Effekte in städtischen Bildszenen aufgezeigt und starke BRDF-Effekte aufweisende Oberflächen im Rahmen von Vorort-Begehungen näher spezifiziert.

Die *Klassifikation von Reflektanzdaten* derselben Bildszene anhand verschiedener Datensätze der Befliegung von 1997 zeigt, daß BRDF-Effekte städtischer Oberflächen die Klassifikation beeinflussen können. Bei dem Vergleich von Klassenkarten aus Daten des DAEDALUS-Scanners finden sich für einzelne Flächen Unterschiede in der Klassenzuweisung, wenn die Reflektanzbilder aus parallel und mit Überlapp geflogenen Flugstreifen stammen. Auch finden sich Unterschiede in der Klassenzuweisung einzelner Flächen, wenn ähnliche Flugstreifen zu verschiedenen Tageszeiten (morgens / mittags) aufgenommen wurden.

Unterschiede in der Klassenzuweisung finden sich insbesondere bei Kies-, Asphalt- und Metalldächern, welche sich auf Änderungen der Reflektanz ρ von $\Delta\rho/\rho \approx 10\%$ bis 20% (Kies- u. Asphalt Dach), in Extremfällen auch bis zu $\Delta\rho/\rho \approx 30\%$ bis 80% (Kies- u. Metalldach) gründen. Diese Unterschiede stellen prinzipiell einen Zugewinn zur Klassifikation von Reflektanzbildern dar.

Damit sich signifikante winkelabhängige Reflektanzunterschiede zeigen, ist es nötig, daß die Oberflächen unter ausgewählten Winkelstellungen beobachtet werden. Für städtische Oberflächen finden sich z.B. signifikante Unterschiede zwischen den Reflektanzwerten der Nadir-Richtung und Reflektanzwerten, welche in der Hauptebene (Vorwärts- und Rückstreurichtung) aufgenommen wurden. Auch der direkte Vergleich von Daten aus Vorwärts- und Rückstreurichtung zeigt signifikante Unterschiede.

Bei der Verwendung von Daten eines Zeilenscanners sind viele sich überlappende, parallel ausgerichtete Flugstreifen nötig, damit derartige Bedingungen für den gesamten Bildinhalt bereits kleinerer Bildszenen gegeben sind. Für eine Klassifikation aufgrund der BRDF-Effekte selbst sollten Flugstreifenausschnitte mit z.B. vergleichbarem Beobachtungswinkel zu einer neuen 'Bildszene mit konstanten Beobachtungswinkel' zusammengefaßt werden.

Verwendet man wenige, z.B. lediglich zwei oder drei, Flugstreifen als Datenbasis und vergleicht die gesamte Bildszene, so finden sich für räumlich verschiedene Oberflächen

gleichen Materials verschiedene Winkelkombinationen. Abhängig vom Oberflächenmaterial und auch deren räumlicher Lage im Flugstreifen zeigt eine BRDF-Effekte aufweisende Oberfläche verschiedene starke Reflektanzunterschiede. Eine einheitliche Zuweisung dieser Oberflächen in Unterklassen kann ohne weiteres Hintergrundwissen nicht erfolgen. Es finden sich durch einen solchen Vergleich zweier Klassenkarten lediglich einzelne Dachflächen, welche sich als eigenständig im Gegensatz zu den vorgegebenen Klassen zeigen. Für den Großteil der Bildszene zeigen sich keine Änderungen in der Klassenzuweisung.

Der quantitative Zugewinn in der Klassifikation aufgrund von BRDF-Effekten kann anhand des vorliegenden Datenmaterials nicht bestimmt werden. Dieser sollte anhand eines räumlich hochauflösenden Satelliten, z.B. IKONOS, näher untersucht werden. Hierzu sollten die verwendeten Bilder einer Stereo-Aufnahme entstammen, um systematische Fehler gering zu halten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zudem ein *Schattenfilter* entwickelt. Dieser nutzt die Reflektanzinformationen aus vier Spektalkanälen (Blau, Grün, Rot u. Nahes Infrarot, entsprechend den vier Kanälen des IKONOS-Satelliten). Der Filter liefert mit den vorgegebenen Schwellwerten eine akzeptable, bei städtischen Flächen auch eine gute Erkennung von Schattenflächen im Sinne des κ -Wertes. Der Filter kann in Verbindung mit anderen Sensoren verwendet werden, wenn diese ähnliche Spektralkanäle aufweisen, wie z.B. die Sensoren DAEDALUS oder LANDSAT. Abhängig vom Bildinhalt und der Pixelauflösung bedarf es ggf. der Anpassung der vorgegebenen Schwellwerte. Liegen unkalibrierte Bilder vor, können die Schwellwerte unter der Annahme einer linearen Kalibration (u.a. Atmosphäre) angepaßt werden.

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich den vielen Leuten danken, die zu dieser Arbeit beigetragen haben. Den Professoren Hartwig Spitzer und Johann Bienlein danke ich für die kritische und konstruktive Unterstützung, die mich den gesamten Verlauf meiner Arbeit begleitete. Die von ihnen motivierte, exzellente Arbeitsatmosphäre findet sich nur in wenigen Arbeitsgruppen.

Den Mitgliedern meiner Arbeitsgruppe 'CENSIS' gilt mein Dank für die zahlreichen Diskussionen und Anregungen. Insbesondere Dr. Gerhard Meister trägt durch die intensiven Diskussionen und die Unterstützung bei den Messungen in Ispra einen wesentlichen Anteil am Erfolg dieser Arbeit. Ergiebige Diskussionen, Arbeiten an verschiedenen Forschungsthemen sowie diverse gemeinsame Freizeitaktivitäten habe ich mit Dr. Ramon Franck, Marc Hermann, Dr. Martin Kollewe, Stefan Kuck, Daniel Kulbach, Caroline Mojert, René Monno, Boris Prinz, Niklas Rega, Anja Speck, Martin Wendt, Dr. Rafael Wiemer und Stefan Zenk geteilt. Nicht unerwähnt bleiben sollten an dieser Stelle Dr. Morton Canty und Dr. Irmgard Niemeyer der Programmgruppe Technologiefolgeforschung (TFF), Forschungszentrum Jülich.

Ich bedanke mich außerdem bei den Arbeitsbereichen KOGS / LKI des Fachbereichs Informatik der Universität Hamburg, bei welchen unsere Arbeitsgruppe nicht nur räumlich integriert wurde. Unter den vielen Kontakten möchte ich Prof. Leonie Dreschler-Fischer, Dieter Jessen, Jörn Tellkamp, Sven Utcke und Dr. Ulrich Köthe hervorheben.

Für die Unterstützung und die angenehme Arbeitsatmosphäre während der Messungen an der European Goniometric Facility (EGO) danke ich Brian Hosgood, Giovanni Andreoli und Dr. Alois Siebert vom Joint Research Centre (JRC), Ispra, Italien.

Die verschiedenen Befliegungskampagnen fanden in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen, statt. Mein Dank geht an Dr. Rudolf Richter, Dr. Manfred Schröder und Volker Ammann.

Für die Unterstützung bei den IRIS-Bodenmessungen in Nürnberg 1997 bedanke ich mich beim Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover, namentlich bei Jürgen Ruder und Dr. Bannert.

Eine Vielzahl von Möglichkeiten zum interdisziplinären Austausch bot sich durch den Forschungsverbund Naturwissenschaft, Abrüstung und internationale Zusammenarbeit (FONAS e.V.). Ich danke vor allem Dr. Götz Neuneck, Institut für Friedensforschung und Sicherheitspolitik an der Universität Hamburg, und Dr. Jürgen Altmann, Experimentelle Physik III, Universität Dortmund.

Der Universität Hamburg danke ich für die finanzielle Unterstützung durch ein zweijähriges Promotionsstipendium. Der Volkswagen-Stiftung danke ich für die Anfangsförderung, welche die Gründung der Arbeitsgruppe ermöglicht hat. Ebenso danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Bundesministerium für Forschung und Bildung (BMBF) für eine kurzzeitige finanzielle Unterstützung.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinem Bruder für die vielseitige Unterstützung.

A Anhang

A.1 Der Zeilenscanner DAEDALUS AADS 1268

Beim DAEDALUS AADS 1268 handelt es sich um einen multispektralen Zeilenscanner, hergestellt von DAEDALUS Enterprises, Inc., Ann Arbor, Michigan, USA. Der von uns genutzte Scanner wird durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen betrieben und wird im Allgemeinen in einer Dornier Do 228 montiert.

Der Sensor hat elf Spektralbänder und überdeckt den sichtbaren bis thermischen Spektralbereich. Abbildung A.1 zeigt eine Prinzipskizze des Scankopfes, eine verallgemeinerte Übersicht zu den aufgezeichneten Spektralbändern gibt die Tabelle A.1. Bedingt durch Wartungsarbeiten ändert sich die genaue spektrale Empfindlichkeit im Laufe der Zeit, eine detaillierte Übersicht für verschiedene Jahre zeigt die Abbildung A.2.

Kanal	Spektralbereich [μm]	Bandbreite [μm] [μm]	Detektormaterial
1	0,42 - 0,45	0,03	Silizium (Si)
2	0,45 - 0,52	0,07	Silizium (Si)
3	0,52 - 0,60	0,08	Silizium (Si)
4	0,605 - 0,625	0,02	Silizium (Si)
5	0,63 - 0,69	0,06	Silizium (Si)
6	0,695 - 0,75	0,055	Silizium (Si)
7	0,76 - 0,90	0,14	Silizium (Si)
8	0,91 - 1,05	0,14	Silizium (Si)
9	1,55 - 1,75	0,20	Indium-Antimonit (InSb)
10	2,08 - 2,35	0,27	Indium-Antimonit (InSb)
11	8,5 - 13,0	4,50	Quecksilber-Kadmium-Tellurit (HgCdTe)

Tabelle A.1: Verallgemeinerte Übersicht der Spektralbereiche des DAEDALUS-Scanners [Kol96]

Der Scanbereich beim DAEDALUS überdeckt einen Winkelbereich von etwa 86° ($\pm 42,96^\circ$ relativ Nadir) bei einem instantanen Öffnungswinkel von 2,5 mrad. Bei einer Flughöhe von 300 m entspricht die Fläche eines einzelnen Bodenelementes damit $0,75 \times 0,75 \text{ m}^2$ im Nadir. Die Abtastung innerhalb einer Scanzeile erfolgt in konstanten Winkelschritten von etwa $0,12^\circ$, eine Scanzeile setzt sich aus insgesamt 716 Bildpixeln zusammen.

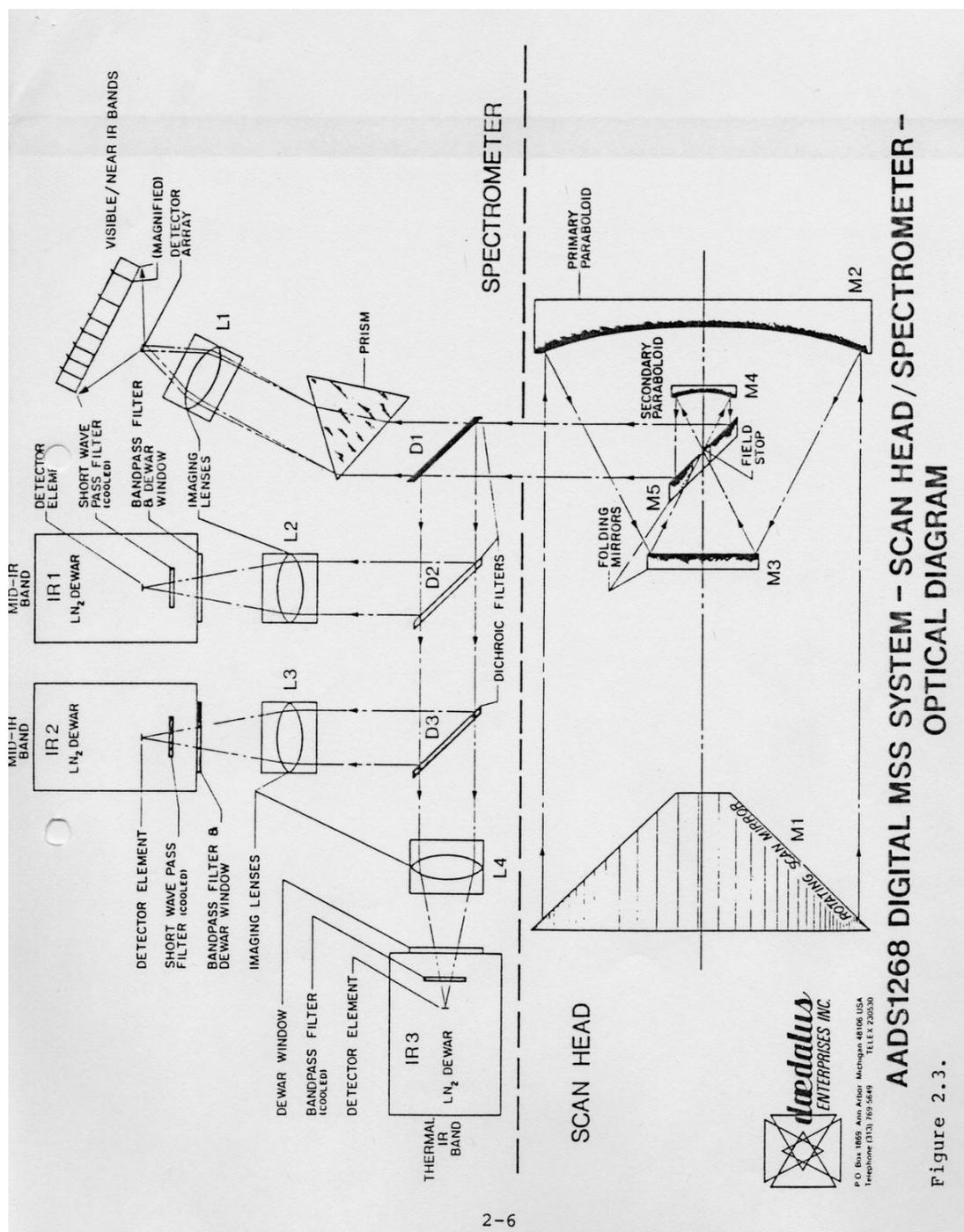


Abbildung A.1: Schematische Darstellung des DAEDALUS AADS 1268 [Dae90]. Die einfallende Strahlung fällt über einen rotierenden Scanspiegel (M1) sowie weitere Umlenkspiegel (M2–M5) auf ein dichroitische Filter (D1). Dieses zerlegt die Strahlung in zwei Spektralbereiche mit Wellenlängen kleiner / größer etwa $1.1 \mu\text{m}$. Der kürzerwellige Anteil wird über ein Prisma weiter spektral aufgespalten und über eine Linse (L1) auf acht Siliziumdetektoren abgebildet. Die weitere Aufspaltung des längerwelligen Anteils geschieht über mehrere hintereinander angeordnete dichroitische Filter (D2, D3) im Strahlengang. Diese reflektieren jeweils einen Teil des Spektrums, welcher auf mit Bandpaß-Filtern versehenen Detektoren abgebildet wird.

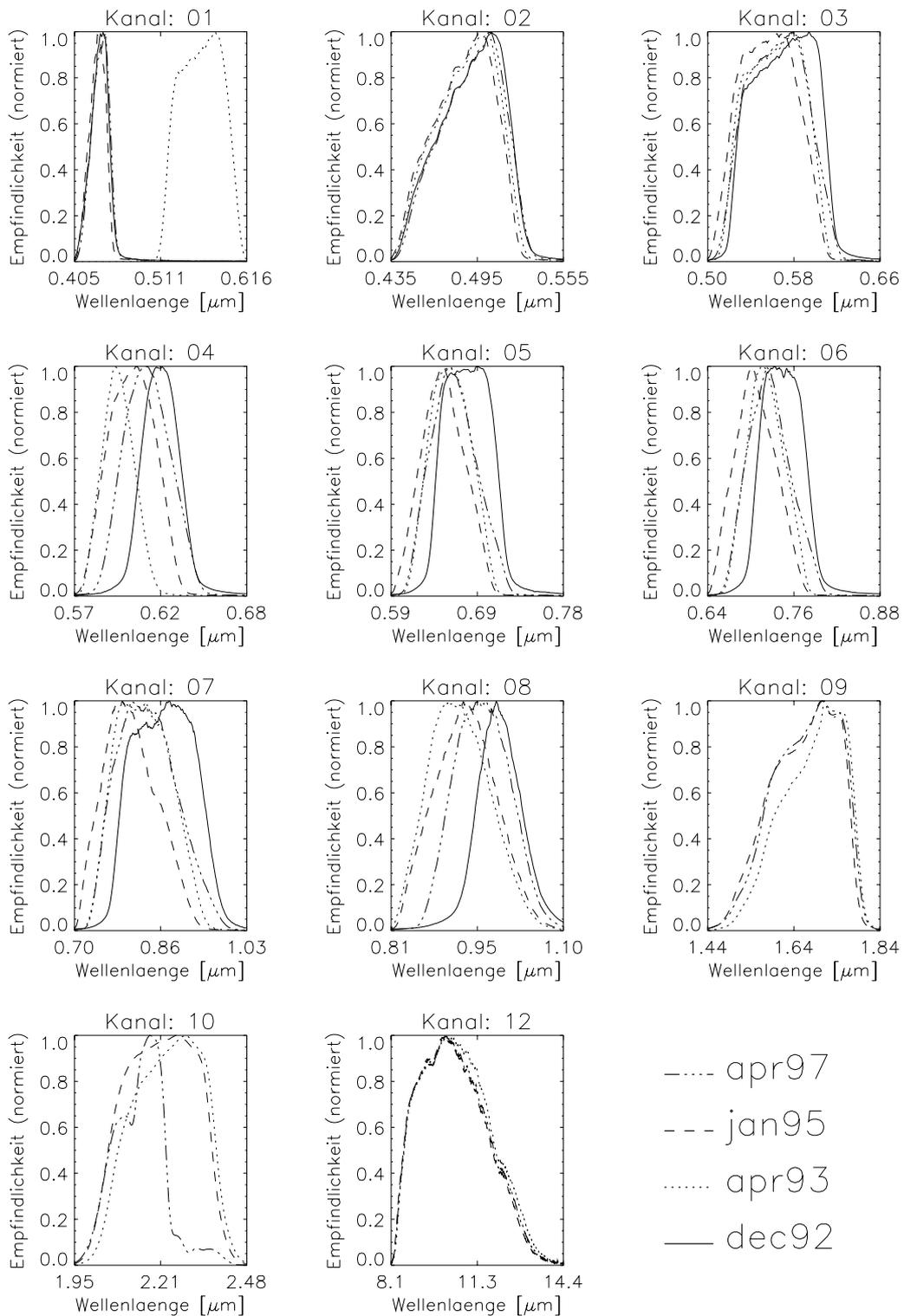


Abbildung A.2: Spektrale Empfindlichkeiten des DAEDALUS AADS1268 in den Jahren 1992, 1993, 1995 und 1997. Abhängig von Kanal-Nummer und Jahr unterscheidet sich die spektrale Empfindlichkeit des Sensors. Auffällig ist insbesondere der Verlauf der Empfindlichkeit im Kanal 1 im Jahr 1993, welche sich deutlich von der Empfindlichkeit der übrigen Jahre unterscheidet. Es ist zu vermuten, daß es sich entgegen der Angabe im Meßdaten-File um eine weitere Messung der Empfindlichkeit des Kanal 3 im Jahr 1993 handelt.

A.2 Reflektanzspektren von Asphalt (Beispiele)

Abb. A.3 illustriert Unterschiede in Reflektanzspektren verschiedener Asphaltoberflächen. Dargestellt sind die Reflektanzspektren von Asphalt im Stadtgebiet Nürnberg ('Asphalt Flughafen' und 'Asphalt Gewerbegebiet'¹, siehe Kap. 3.1.2) sowie Spektren anderer Asphaltflächen, welche während zweier Meßkampagnen am Joint Research Center gemessen wurden (gekennzeichnet mit 'EGO'; siehe auch [Mei00]). Es ist zu erkennen, daß es größere Unterschiede im Rückstrahlvermögen zwischen den verschiedenen Asphaltflächen gibt. Es sind sowohl Asphaltflächen mit geringem als auch mit hohem Rückstrahlvermögen erkennbar, wobei die Reflektanzspektren Werte zwischen etwa 0,05 und 0,3 annehmen. Weiterhin ist noch ein aus den IKONOS-2 Daten gewonnenes Reflektanzspektrum der 'Asphaltfläche Gewerbegebiet' dargestellt. Es handelt sich bei der Fläche um dieselbe Fläche im Gewerbegebiet in Nürnberg, deren Spektrum in der Abb. A.3 mit 'Asphalt Gewerbegeb. (IRIS'97)' bezeichnet ist. Die Daten wurden im März 2000 aufgenommen und durch R. Richter, DLR, Oberpfaffenhofen mit dem von ihm entwickelten Programm ATCOR² in Reflektanzwerte umgerechnet. Das mit ATCOR bestimmte Spektrum zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Spektralverlauf der 1997'er Messung bei größeren Wellenlängen (IKONOS-Kanäle 3 (Rot) u. 4 (NIR)). Größere Abweichungen (bis zu absolut +4% · ρ) sind bei kürzeren Wellenlängen feststellbar (IKONOS-Kanäle 1 (Blau) u. 2 (Grün)).

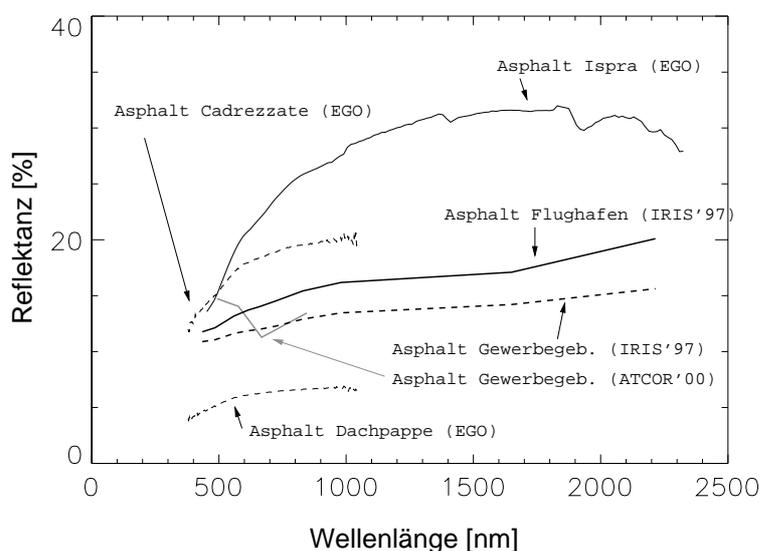


Abbildung A.3: Reflektanzspektren verschiedener Asphaltflächen. Die Spektren wurden bei Kampagnen in Nürnberg (Bodenmessungen 1997; Satellitenbild 2000) und in Ispra, Italien (Labormessungen 1999, gekennzeichnet mit 'EGO') gemessen. Die Messungen erfolgten bei einem Beobachtungszenit von 0° ('Nadir'), einzig das Spektrum aus den Satellitendaten (ATCOR'00) wurde unter einem Beobachtungszenitwinkel von etwa 16° aufgenommen. Die 'EGO'-Spektren wurden im Rahmen eines Meßprogramms von G. Meister am JRC gemessen [Mei00].

Man beachte, daß es sich bei der Abb. A.3 lediglich um eine qualitative Illustration handelt. Die Spektren sind in verschiedenen Jahren aufgenommen ('IRIS' 1997, 'EGO' 1999 u. 'ATCOR' 2000) und mit unterschiedlicher spektraler Auflösung dargestellt.

¹In die spektrale Auflösung des DAEDALUS umgerechnete Reflektanzen des IRIS-Spektorradiometers.

²Atmospheric Correction and Haze Removal of Multispectral and Hyperspectral Satellite Images.

A.3 Scanstreifen mit starker Bewölkung



Abbildung A.4: Scanstreifen mit starker Bewölkung. Für die von der Abschattung der Wolke betroffene Bildszene wird die einfallende Strahlungsflußdichte überschätzt, woraus zu niedrige Reflektanzwerte folgen können.

A.4 Zum Detektoraufbau des SE590

Das Spektroradiometer SE590 wurde während der Labormessungen im Grundaufbau (Standard-Spalt-Apertur) betrieben, siehe Kap. 4.1.1. Die einfallende Strahlung fällt dabei durch die in Abb. A.6 skizzierte Standard-Spalt-Apertur und wird durch eine Kollimatorlinse auf ein Beugungsgitter gelenkt. Generell zerlegt dieses das einfallende Licht in seine spektralen Bestandteile³, welche durch eine weitere Linse auf die Detektordioden abgebildet werden. Eine Skizze des Detektoraufbaus zeigt Abbildung A.5.

³Die Labormessungen wurden in dieser Arbeit mit einem monochromatischem HeNe-Laser durchgeführt. Als Folge des Detektoraufbaus verteilt sich das gemessene Signal auf einige benachbarte Detektordioden, siehe Kap. 4.1.1.

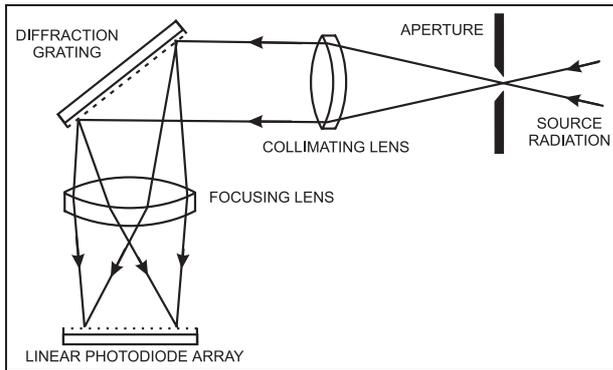


Abbildung A.5: Skizze Detektoraufbau, nach [Spe87b].

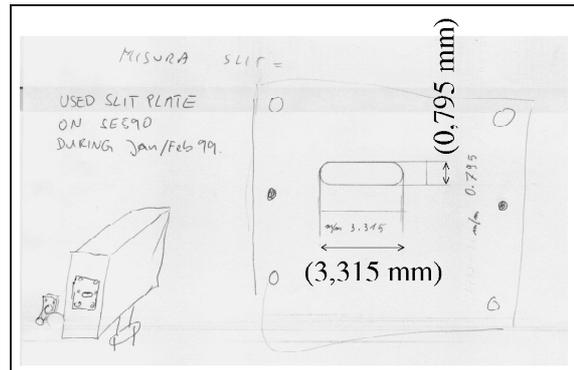


Abbildung A.6: Skizze der Standard-Spalt-Apertur am SE 590, nach Angaben von B. Hosgood, Joint Research Center / SAI / TDP Unit, Ispra, Italien.

Das Spektrometer kann neben dem Grundaufbau mit verschiedenen vorgeschalteten Optiken betrieben werden. Eine Übersicht zeigt die Abbildung A.7. Messungen zum spektralen Auflösungsvermögen des Detektors bei Verwendung der 1° - bzw. 15° -Optiken sind in Kap. 4.1.1 beschrieben. Mit der 1° -Optik wurde in [Mei00] gemessen.

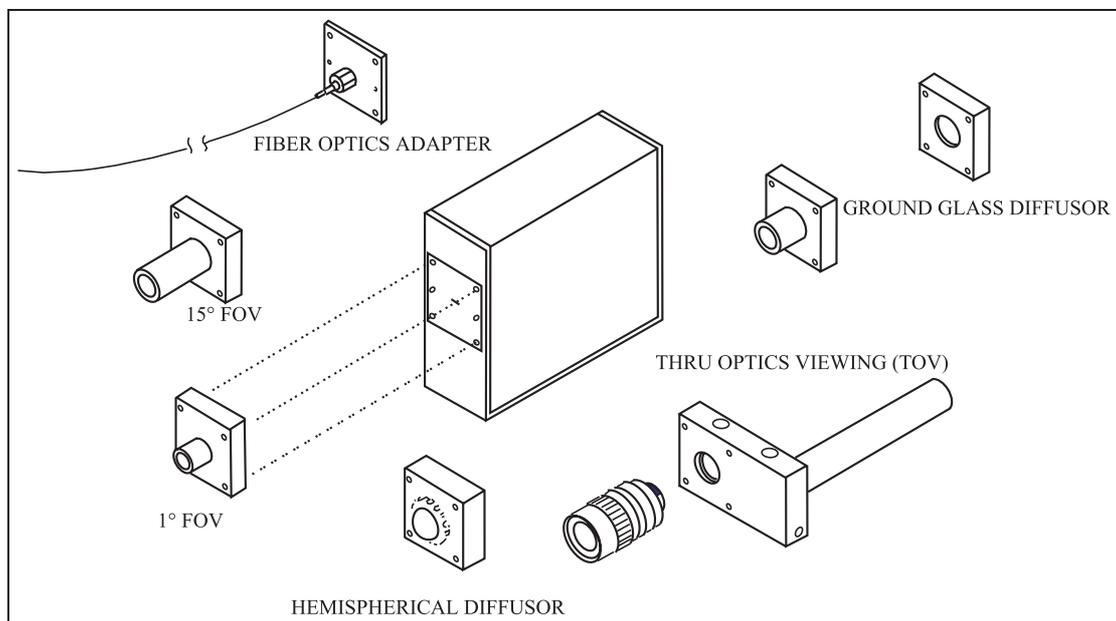


Abbildung A.7: Skizze Detektorbestückung, nach [Spe87a].

A.5 Messungen zu Geräteeigenschaften des SE590

Im Vorfeld der eigentlichen Probenmessungen wurden verschiedene Messungen zu den Eigenschaften von Detektor und Lichtquelle durchgeführt. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

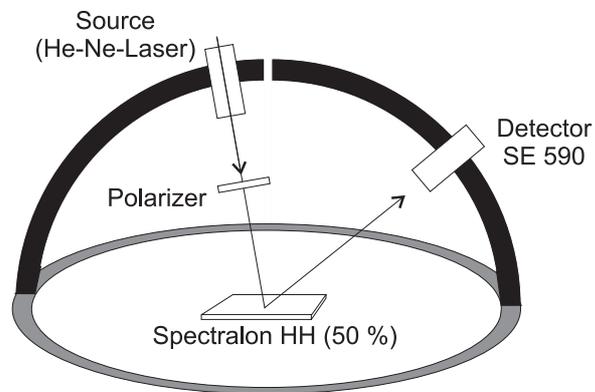
A.5.1 Messung des Polarisationsgrad des verwendeten Lasers

Mit dem folgendem Aufbau (vgl. Abbildung A.8) wurden auch Messungen zum Polarisationsgrad P durchgeführt. Dieser bestimmt sich aus den Intensitäten, bei welchen nur der parallele (I_{\parallel}) bzw. senkrechte (I_{\perp}) Anteil der Strahlung relativ zur Polarisationssebene des Lasers gemessen wird

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}} \quad [\text{dimensionslos}] \quad (\text{A.1})$$

In den Strahlengang zwischen Quelle und Spectralonfläche wurde hierzu ein Polarisationsfilter gebracht, vgl. Abbildung A.8. Die Filterebene war senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls orientiert. Durch Verdrehen des Polarisationsfilters innerhalb der Filterebene wurden maximale Intensität I_{\parallel} und minimale Intensität I_{\perp} je fünf mal bestimmt. Für den verwendeten HeNe Laser ergibt sich danach ein Polarisationsgrad von $P \approx 0.9997 \pm 0.0002$. Der Laser kann also als linear polarisiert angesehen werden.

Abbildung A.8: Meßaufbau zur Bestimmung des Polarisationsgrades des verwendeten He Ne Lasers. In den Strahlengang zwischen Laser und Spectralon wurde ein Polarisationsfilter gebracht (Filterebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls). Durch Drehen des Filters wurden die maximale und minimale Intensität bestimmt.



A.5.2 Gesichtsfeld des Detektors

Die Größe des Gesichtsfeldes wird vom Hersteller mit etwa 6° angegeben [Spe87b], Probenmessungen am EGO⁴ bestimmten diese auf etwa 8° . Bei dem von uns verwendeten Aufbau entspricht dies einem Durchmesser von etwa 19 cm auf der Probenfläche. Mit Hilfe eines Punktlasers (Strahldurchmesser etwa 1 bis 2 mm) der Wellenlänge 543 nm sollte

⁴B. Hosgood, Joint Research Center / SAI / TDP Unit, Ispra, Italien, persönliche Mitteilung

die Größe des Gesichtsfeld verifiziert werden. Auf den Probenhalter wurde hierzu ein mit Markierungen versehenes Blatt Papier (siehe Abbildung A.9) befestigt und ausgerichtet. Auf diesem wurden anschließend die Umrandungen der vom roten Laser bei unterschiedlichen Einfallswinkeln und Polarisationsrichtungen ausgeleuchteten Fläche markiert. Nach Abschalten des roten Lasers wurde der grüne Laser nacheinander auf verschiedene Markierungen ausgerichtet und jeweils eine Messung mit im Nadir stehendem Detektor ($\theta_r = 0^\circ$) aufgezeichnet. Die Messungen mit grünem Laser wurden für Azimutstellungen des Detektors von DA=0 und DA=180 durchgeführt. Nach einer ersten Auswertung der Messungen wurde eine weitere Meßreihe bei grünem Laserlicht durchgeführt. Im Gegensatz zur ersten Meßreihe wurden die Abstände zwischen den einzelnen Markierungen halbiert. Weiterhin wurde auch entlang der um 45° um den Mittelpunkt gedrehten Einzelmarkierungen gemessen.

Abbildung A.9 zeigt den Großteil des in den ersten Messungen verwendeten Papierblattes. Zu sehen sind entlang eines Grundkreuzes angebrachte Markierungen (teilweise mit einer Indizierung versehen, z.B. S11). Die Ellipsen zeigen die Umrandung der vom roten Laser ausgeleuchteten Fläche mit zugehörigem Einfallswinkel θ_i . Die Farbe der Ellipsen kennzeichnet die Polarisationsrichtung des Laserlichtes; blau kennzeichnet s-Polarisation. Zu erkennen ist ein Versatz der ausgeleuchteten Fläche von etwa 1.5 bis 2 cm senkrecht zu Einstrahlungsebene des Lichtes (Versatz entlang der Linie von S12 nach S22). Dieser ist auf die Drehung des Lasers zur Änderung der Polarisationsrichtung zurückzuführen. Die Stern-Symbole geben an, an welcher Markierung auf dem Blatt noch ein Signal des grünen Lasers gemessen werden konnte. Die roten und blauen Symbole wurden mit der ersten Meßreihe bestimmt und geben die unterschiedliche Azimutposition des Detektors an. Die grünen Symbole zeigen die entsprechenden Ergebnisse für die erweiterte Meßreihe, bei welcher nur in der Azimutstellung DA=180 gemessen wurde.

Die Messungen zeigen, daß die Größe der ausgeleuchteten Fläche teilweise größer ist als das Gesichtsfeld, z.B. bei $\theta_i = 65$ Grad. Dadurch gelangt nicht die gesamte von der Probe reflektierte Strahlung in den Detektor, das Meßsignal wird verfälscht (der schließlich berechnete BRDF-Wert wird unterschätzt). Hieraus ist zu schließen, daß für Messungen bei kleinem Beobachtungswinkel und großem Einfallswinkel die Unsicherheit des Meßwertes durch eine zusätzliche systematische Fehlerquelle vergrößert wird. Da mit zunehmendem Beobachtungswinkel auch die betrachtete Fläche zunimmt, tritt dieser Effekt im wesentlichen nur bei Beobachtungswinkeln nahe Nadir auf. Dadurch bedingt, daß zwischen diesen Kontrollmessungen und den eigentlichen Messungen Änderungen an der Justierung der Lampe durchgeführt wurden, sehen wir von einer nachträgliche Korrektur der Daten in Bezug auf diesen Effekt ab. Die für diese Fehlerquelle 'anfälligen' Messungen wurden bei der Modellanpassung nicht berücksichtigt.

A.6 Verwendete Steuerfiles für das Goniometer

Die Einstellung der Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel sowie die Datennahme erfolgte mit Hilfe eines an das Goniometer angeschlossenen Computers über Steuerdateien. Die

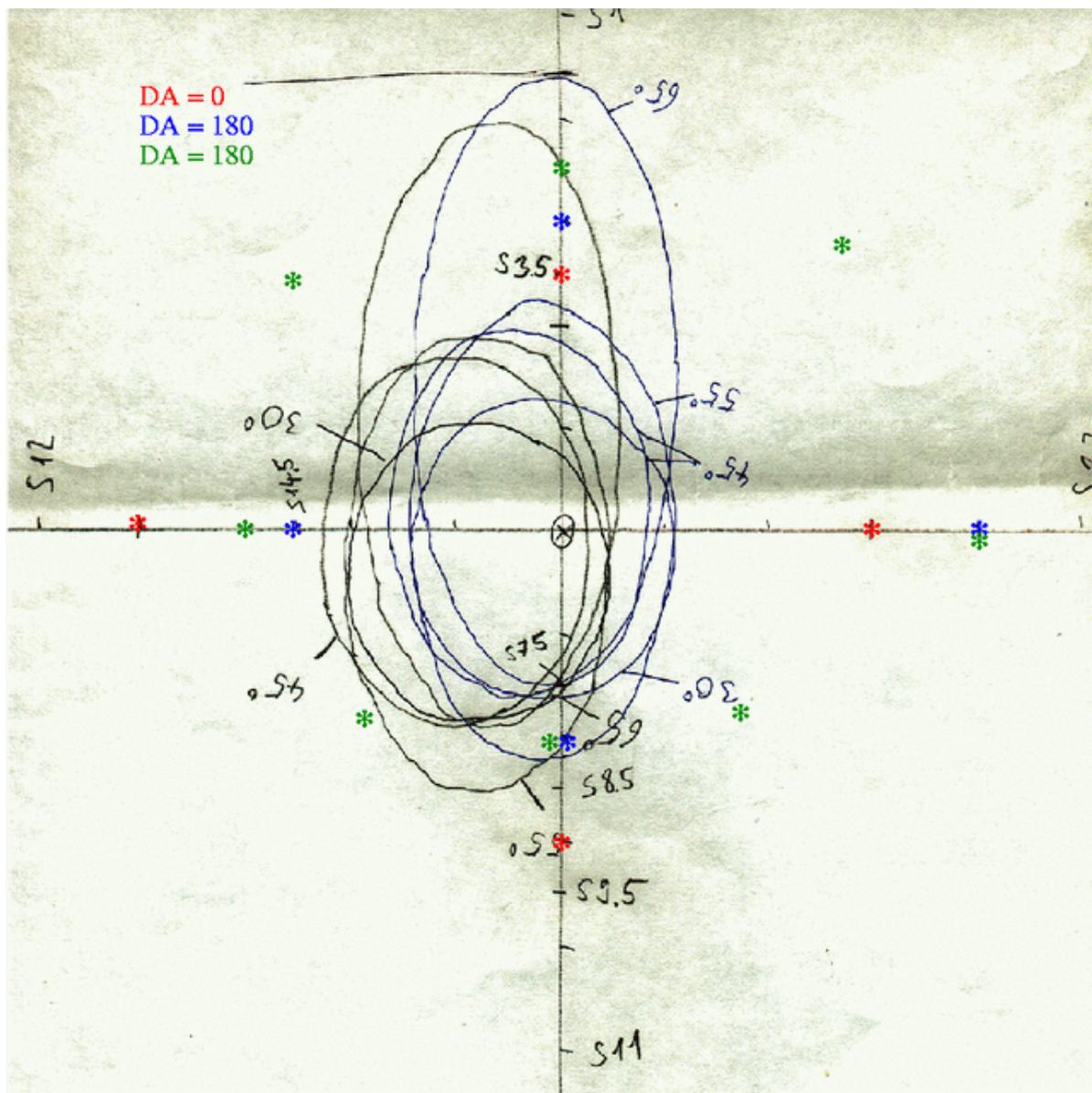


Abbildung A.9: Ergebnisse der Gesichtsfeldmessung des verwendeten SE590 Detektors im Grundaufbau (Standard-Spalt). Zu sehen sind entlang eines Grundkreuzes angebrachte Markierungen (teilweise mit einer Indizierung versehen, z.B. S11). Die Ellipsen zeigen die Umrandung der vom roten Laser ausgeleuchteten Fläche mit zugehörigem Einfallswinkel θ_i . Die Farbe der Ellipsen kennzeichnet die Polarisationsrichtung des Laserlichtes; blau kennzeichnet *s*-Polarisation. Die Stern-Symbole geben an, an welcher Markierung auf Position noch ein Signal eines Punktlasers gemessen werden konnte. Die roten und blauen Symbole wurden in einer ersten Meßreihe bestimmt und kennzeichnen unterschiedliche Azimutpositionen des Detektors an. Die grünen Symbole zeigen die Ergebnisse einer erweiterten Meßreihe.

in dieser Arbeit verwendeten Steuerdateien sind im Anschluß an eine nähere Beschreibung über den Aufbau der Steuerdateien zu finden. Für einen besseren Überblick der durch die Steuerdateien abgedeckten Winkelstützstellen sind in Kap. A.6.2 Illustrationen zu finden. Diese wurden mit Hilfe eines von G. Meister, CENSIS zur visuellen Überprüfung der Steuerdateien geschriebenen Programmes erstellt.

Die im Folgenden genannten Steuerdateien sowie einige für das Einlesen der Meßdaten in IDL⁵ von uns geschriebene Programme stehen am Joint Research Centre (JRC), Ispra, Italien zur Verfügung.

A.6.1 Aufbau der Steuerfiles

Bei einer am Goniometer des JRC, Ispra, Italien zu verwendenden Steuerdatei handelt es sich um eine normale ASCII-Datei. Über diese werden Positionierungs- und Ausleseanweisungen an den Steuerungs-Computer übergeben. Mögliche Anweisungen sind:

Anweisung	Ereignis
#	Kennzeichnung einer Kommentarzeile
RPA: <i>Winkel</i> , <i>Zahl1</i> , <i>Zahl2</i>	Führe eine Messung nach einer Bewegung um <i>Zahl1</i> Grad entlang <i>Winkel</i> durch. Wiederhole diese Anweisung <i>Zahl2</i> -mal. <i>Winkel</i> gibt dabei an, welche Beobachtungs- bzw. Beleuchtungsposition geändert werden soll: DA → Azimutposition des Detektors DE → Zenitposition des Detektors SE → Zenitposition der Lichtquelle SA → Azimutposition der Lichtquelle (prinzipiell möglich, sollte unterlassen werden)
RPN: <i>Winkel</i> , <i>Zahl1</i> , <i>Zahl2</i>	Anweisung wie 'RPA', jedoch ohne Durchführung von Messungen
WTN: <i>Zahl</i>	Wartezeit [s] für Detektorauslese Standardwert ist <i>Zahl</i> = 5

Tabelle A.2: Anweisungen in der Steuerdatei des Goniometers am JRC, Ispra, Italien.

Bei den Positionsangaben in der Steuerdatei handelt es sich um Angaben in [Grad], welche eine einfache Umrechnung in Zenit- oder Azimutwinkel ermöglichen. Um zu den Angaben der Zenitwinkel zu gelangen braucht man beim Detektor (DE) lediglich den Absolutwert zu bilden und erhält den Beobachtungszenitwinkel θ_r . Die Umrechnung in den Einfallszenitwinkel θ_i hängt von der verwendeten Lichtquelle ab. Bei dem verwendeten HeNe Laser ist die Quelle um -6.7° aus dem Nadir verschoben. Die Umrechnung

⁵Interactive Data Language, Fa. Research Systems, Inc., 4990 Pearl East Circle, Boulder, CO 80301, USA, <http://www.rsinc.com>

in den Einfallswinkel θ_i geschieht durch Addition von 6.7° und anschließender Absolutwertbildung ($SE = -36.7$ bedeutet also einen Einfallswinkel von $\theta_i = 30^\circ$). Der Relativazimutwinkel kann durch Differenzbildung aus Quellen- und Detektorposition bestimmt werden (ggf. Vorzeichen und Wertebereich beachten).

Bezüglich der Azimutposition der Lichtquelle ist zu erwähnen, daß diese nach Möglichkeit nicht verändert werden soll und fest bei $SA = 180^\circ$ eingestellt ist (Änderungen im Relativazimutwinkel zwischen Probe und Lichtquelle müssen dann durch eine Drehung der Probe erfolgen). Die Azimutposition der Lichtquelle bleibt deshalb in den aufgeführten Steuerdateien unverändert.

Die folgende Steuerdateien wurde für Messungen unter Laserlicht verwendet:

- **FGIPP1.SCE**: Messungen mit Laserlicht, Hauptebene (Teil 1)
- **FGIPP2.SCE**: Messungen mit Laserlicht, Hauptebene (Teil 2)
- **FGL_HK.SCE**: Messungen mit Laserlicht, obere Halbkugel

Die Messungen in der Hauptebene wurden anhand einer zweigeteilten Steuerdatei ('FGIPP1.SCE' und 'FGIPP2.SCE') durchgeführt. Durch 'FGIPP1.SCE' werden Messungen in der Hauptebene bei den verschiedenen Einfallswinkeln $\theta_i = 30^\circ, 45^\circ, 55^\circ$ und 65° durchgeführt, die Detektorzenitwinkel werden mit einer Schrittweite von 5° abgefahren. Die Annäherung zwischen Lichtquelle und Detektor ist durch die Geräteausmaße auf eine Zenitwinkeldifferenz von 15° begrenzt. Aufgrund der Montage von Quelle und Detektor an Viertelbögen ist zur Überdeckung von Vorwärts- und Rückwärtsstreurichtung eine Azimutdrehung eines der Viertelbögen um 180° nötig. Hierfür wird der den Detektor tragende Viertelbogen gedreht.

Zu beachten ist, daß die Messung nicht in der ursprünglichen Startposition der Meßreihe endet und somit durch erneuten Aufruf keine Wiederholung der Meßreihe erlaubt. Zum Erreichen der ursprünglichen Startposition ist die Abarbeitung des zweiten Teils 'FGIPP2.SCE' nötig. Durch dieses werden Messungen an den gleichen Winkelstellen wie in 'FGIPP1.SCE' vorgenommen, nur erfolgt der Ablauf in umgekehrter Reihenfolge zu 'FGIPP1.SCE' (die Steuerdatei 'FGIPP2.SCE' wird aus Platzgründen nicht aufgeführt).

Die durch die Aufteilung des Meßablaufs erzwungene 'Unterbrechung' wurde dazu verwendet, die Stellung des Polarisationsfilters zu ändern (die Einstellung der Polarisationsfilter erfolgt manuell).

Die Messungen außerhalb der Hauptebene wurden mit der Steuerdatei 'FGL_HK.SCE' durchgeführt. Durch diese werden Messungen bei Einfallswinkeln von $\theta_i = 30^\circ$ und $\theta_i = 50^\circ$ vorgenommen. Der Detektor wird durch die Steuerdatei über einen Großteil der oberen Halbkugel geführt, insbesondere werden Messungen in der Nähe der Spiegelungsrichtung vorgenommen. Die Azimutposition der Lichtquelle bleibt für alle Messungen dieselbe, nämlich $SA = 180^\circ$. Der Detektorazimut wird in einem Bereich von -30° bis 180° bewegt, bei $DA = 0^\circ$ beträgt der Relativazimutwinkel 180° .

Steuerfile 'fgipp1.sce (part 1)'

```
#scenario file fgipp1.sce (part 1)
#for polarization measurements in principal plane
#starting point is at
#DA=180,DE=-70,SE=-36.7 (lamp = -30)
WTN:5
RPA:DE,0,1
#DA=180,DE=-70,SE=-36.7
RPA:DE,5,5
#DA=180,DE=-45,SE=-36.7
RPN:DA,-30,1
#DA=150,DE=-45,SE=-36.7
RPN:DE,30,1
#DA=150,DE=-15,SE=-36.7
RPA:DA,30,1
#DA=180,DE=-15,SE=-36.7
RPA:DE,5,3
#DA=180,DE=0,SE=-36.7
RPA:SE,-15,1
#DA=180,DE=0,SE=-51.7
RPA:DE,-5,6
#DA=180,DE=-30,SE=-51.7
RPN:DA,-30,1
#DA=150,DE=-30,SE=-51.7
RPN:DE,-30,1
#DA=150,DE=-60,SE=-51.7
RPA:DA,30,1
#DA=180,DE=-60,SE=-51.7
RPA:DE,-5,2
#DA=180,DE=-70,SE=-51.7
RPA:SE,-10,1
#DA=180,DE=-70,SE=-61.7
RPN:DA,-30,1
#DA=150,DE=-70,SE=-61.7
```

```
RPN:DE,30,1
#DA=150,DE=-40,SE=-61.7
RPA:DA,30,1
#DA=180,DE=-40,SE=-61.7
RPA:DE,5,8
#DA=180,DE=0,SE=-61.7
RPA:SE,-10,1
#DA=180,DE=0,SE=-71.7
RPA:DE,-5,10
#DA=180,DE=-50,SE=-71.7
RPA:DA,-180,1
#DA=0,DE=-50,SE=-71.7
RPA:DE,-5,4
#DA=0,DE=-70,SE=-71.7
RPA:DE,25,1
#DA=0,DE=-45,SE=-71.7
RPA:DE,5,9
#DA=0,DE=0,SE=-71.7
RPA:SE,10,1
#DA=0,DE=0,SE=-61.7
RPA:DE,-5,14
#DA=0,DE=-70,SE=-61.7
RPA:SE,10,1
#DA=0,DE=-70,SE=-51.7
RPA:DE,5,14
#DA=0,DE=0,SE=-51.7
RPA:SE,15,1
#DA=0,DE=0,SE=-36.7
RPA:DE,-5,14
#DA=0,DE=-70,SE=-36.7
#
#after changing detector or source
#polarization 'fgipp2.sce' to continue
```

Steuerfile 'fgihk.sce'

```
#scenario file fgihk.sce
#laser measurements over half
# hemisphere, detector
# WITHOUT polarizer
#starting point is at
#DA=180,DE=-70,SE=-36.7
# (lamp = 30)
WTN:5
RPA:DE,0,1
#DA=180,DE=-70,SE=-36.7
RPA:DE,10,2
#DA=180,DE=-50,SE=-36.7
RPA:DA,-10,1
#DA=170,DE=-50,SE=-36.7
RPA:DE,-10,2
#DA=170,DE=-70,SE=-36.7
RPA:DA,-15,1
#DA=155,DE=-70,SE=-36.7
RPA:DA,-20,1
#DA=135,DE=-70,SE=-36.7
RPA:DE,10,4
#DA=135,DE=-30,SE=-36.7
RPA:DA,-45,1
#DA=90,DE=-30,SE=-36.7
RPA:DE,-10,4
#DA=90,DE=-70,SE=-36.7
RPA:DA,-45,1
#DA=45,DE=-70,SE=-36.7
RPA:DE,10,4
#DA=45,DE=-30,SE=-36.7
RPA:DA,-10,2
#DA=25,DE=-30,SE=-36.7
RPA:DE,-10,4
```

```
#DA=25,DE=-70,SE=-36.7
RPA:DA,-10,1
#DA=15,DE=-70,SE=-36.7
RPA:DE,10,5
#DA=15,DE=-20,SE=-36.7
RPA:DA,-10,1
#DA=5,DE=-20,SE=-36.7
RPA:DE,-10,5
#DA=5,DE=-70,SE=-36.7
RPA:DA,-5,1
#DA=0,DE=-70,SE=-36.7
RPA:DE,10,2
#DA=-50,SE=-36.7 (*)
RPA:DE,5,8
#DA=0,DE=-10,SE=-36.7
RPA:DE,10,1
#DA=0,DE=0,SE=-36.7
RPA:DA,-30,1
#DA=-30,DE=0,SE=-36.7
RPA:DE,-30,1
#DA=-30,DE=-30,SE=-36.7
RPA:DE,-20,1
#DA=-30,DE=-50,SE=-36.7
RPA:SE,-20,1
#DA=-30,DE=-50,SE=-56.7
RPA:DA,5,6
#DA=0,DE=-50,SE=-56.7
RPA:DE,50,1
#DA=0,DE=0,SE=-56.7
RPA:DE,-10,3
#DA=0,DE=-30,SE=-56.7
RPA:DE,-5,8
#DA=0,DE=-70,SE=-56.7
```

```
RPA:DA,5,1
#DA=5,DE=-70,SE=-56.7
RPA:DE,10,4
#DA=5,DE=-30,SE=-56.7
RPA:DA,10,1
#DA=15,DE=-30,SE=-56.7
RPA:DE,-10,4
#DA=15,DE=-70,SE=-56.7
RPA:DA,10,1
#DA=25,DE=-70,SE=-56.7
RPA:DE,10,2
#DA=25,DE=-50,SE=-56.7
RPA:DA,20,1
#DA=45,DE=-50,SE=-56.7
RPA:DE,-10,2
#DA=45,DE=-70,SE=-56.7
RPA:DA,45,1
#DA=90,DE=-70,SE=-56.7
RPA:DE,10,5
#DA=90,DE=-20,SE=-56.7
RPA:DA,45,2
#DA=180,DE=-20,SE=-56.7
RPA:DE,-5,2
#DA=180,DE=-30,SE=-56.7
RPA:DA,-15,2
#DA=150,DE=-30,SE=-56.7
RPA:DE,-10,4
#DA=150,DE=-70,SE=-56.7
RPA:DA,10,3
#DA=180,DE=-70,SE=-56.7
RPA:SE,20,1
#DA=180,DE=-70,SE=-36.7
# (starting position)
```

(*) Kommentarzeile fehlerhaft, richtig muß es lauten: #DA=0,DE=-50,SE=-36.7

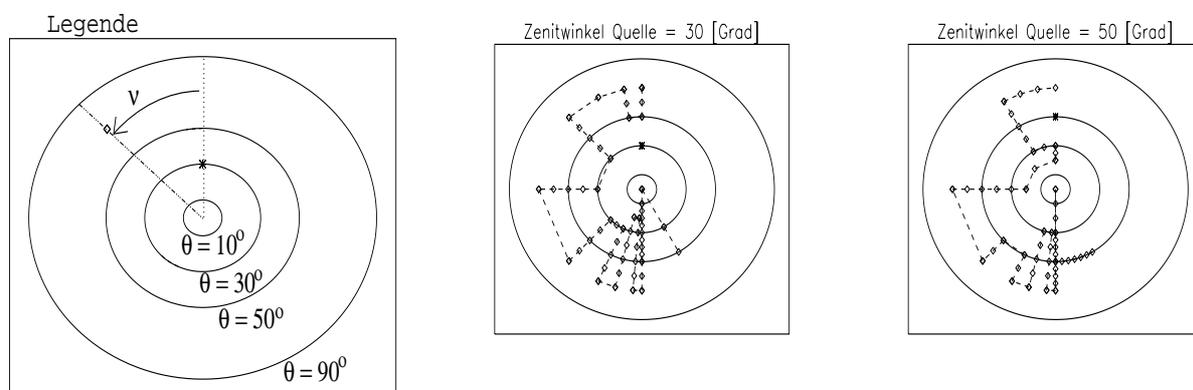


Abbildung A.11: Polardarstellung der Winkelabdeckung der Messungen in der ohne Polarisationsfilter. Die in einem Plot unveränderte Lampenstellung ist durch das '*'-Symbol gegeben, die \diamond -Symbole zeigen die gewählten Detektorstellungen. Symbole entlang einer Kreislinie entsprechen Messungen bei konstantem Zenitwinkel, Symbole entlang einer radial vom Kreismittelpunkt wegführenden Linie entsprechen Messungen mit konstantem Relativazimutwinkel und zunehmendem Zenitwinkel (der Kreismittelpunkt entspricht einem Zenitwinkel von 0° , der äußerste Kreis entspricht einem Zenitwinkel von 90°). Befinden sich '*'- und \diamond -Symbole auf einer vom Kreismittelpunkt aus gedachten Geraden, so beträgt der Relativazimutwinkel Null Grad und die Messungen gehen in Rückstreurichtung (vgl. linken Teilplot).

A.7 Ergebnisse des Schattenfilters für die Nürnberg-Gesamtszene

Eine Teilszene (Gewerbegebiet 'Andernacher Straße', siehe Abb. 6.5) der IKONOS-2 Aufnahme von Nürnberg wurde von R. Richter, DLR⁶, Oberpfaffenhofen in ein Reflektanzbild umgerechnet. Diese Teilszene wurde genutzt, um ein Reflektanzbild der gesamten Nürnberg-Szene zu erstellen. Hierzu wurden aus dem kanalweisen Vergleich von Reflektanz- und Rohdatenbild die Koeffizienten a_j, b_j einer linearen Transformation $y_j = a_j \cdot x_j + b_j$ bestimmt, welche anschließend zur Umrechnung der Gesamtszene in ein Reflektanzbild verwendet wurden. Abb. A.12 zeigt den Vergleich zwischen Reflektanz- und Rohdaten der Teilszene sowie die aus ihnen bestimmten Transformationsgeraden. Die zugehörigen Transformationskoeffizienten finden sich in Tabelle A.3. Die Reflektanzbilder der Teilszene wurden als 'Reflektanzprozent mal vier' mit einer Tiefe von 8-Bit gespeichert, d.h. der zum Grauwert 255 gehörige Reflektanzwert ist 63.75 %. Größere Reflektanzwerte wurden ebenfalls als 63.75 Reflektanzprozent abgelegt und sind dadurch verfälscht. Diese sind in den Teilplots als parallel zur x-Achse liegende Linien zu erkennen und wurden bei der Bestimmung der Transformationskoeffizienten nicht verwendet.

Kanal	a [%] Grauwert	b [%]	Mittl. / Max. Abweichung [%] / [%]
1	0.146	-26.04	0.427 / 7.804
2	0.101	-14.58	0.312 / 3.173
3	0.088	-8.42	0.251 / 3.735
4	0.093	-5.62	0.147 / 3.577

Tabelle A.3: Transformationskoeffizienten zur Umrechnung der IKONOS-Daten von Nürnberg in ein Reflektanzbild. Die Koeffizienten entstammen dem Vergleich von Roh- und korrespondierenden Reflektanzwerten der Teilszene 'Gewerbegebiet in Ziegelstein'(siehe Abb. 6.5). Diese Teilszene wurde von R. Richter, DLR, Oberpfaffenhofen in ein Reflektanzbild umgerechnet.

Die in den Einheiten verwendeten Prozentangaben bezeichnen Reflektanzprozent.

Das durch lineare Transformation bestimmte Reflektanzbild ist in Abb. A.13 illustriert. Auf dieses Reflektanzbild wurde der in Kapitel 6.1.4 beschriebene Schattenfilter unter Verwendung zweier verschiedener Form-Kriterien angewendet.

Als Form-Kriterium wurde zum einen das Verhältnis von Objektumfang zu Objektfläche wie in Abb. 6.10 als Auswahlkriterium verwendet, zum anderen das Verhältnis von Objektumfang zur Quadratwurzel der Objektfläche.

Form-Kriterium 1: Umfang / Fläche < Schwellwert1

Form-Kriterium 2: Umfang / $\sqrt{\text{Fläche}}$ < Schwellwert2

⁶Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

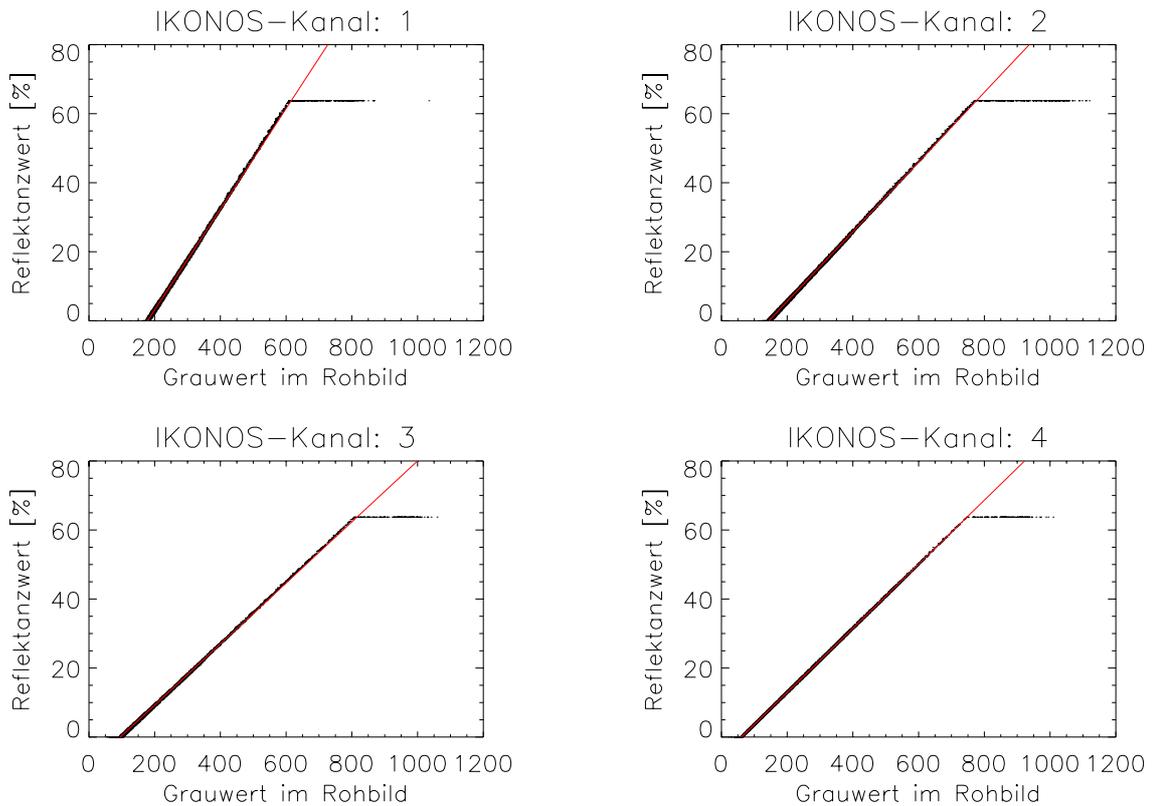


Abbildung A.12: Vergleich von Reflektanz- und Rohdatenbild für die vier Kanäle des IKONOS-2-Satelliten. In einem Teilplot ist für alle Pixel der Teilszene aus Abb. 6.5 der Grauwert eines Bildpixels des Rohdatenbildes gegen den korrespondierenden Grauwert des Reflektanzbildes aufgetragen. Die parallel zur x-Achse liegenden Linien sind auf die Beschränkung des Reflektanzbildes auf Reflektanzwerte ≤ 63.75 zurückzuführen. Diese wurden bei der Bestimmung der Transformationskoeffizienten nicht verwendet. Beachte zudem, daß die aus diesen Plots nicht ersichtliche, große Häufigkeit von Pixeln niedriger Reflektanz die Lage der Geraden beeinflusst.

Im ersten Kriterium trägt die Objektgröße selbst zur Entscheidung über den Ausschluß oder den Verbleib in der Schattenmaske bei. Betrachtet man z.B. zwei Quadrate Q_1 , Q_2 mit den Kantenlängen $a_1 = 5$, $a_2 = 10$, so ergibt sich für Q_1 ein Verhältnis von Umfang zu Fläche von $4/5 = 0,8$ und somit verbliebe das Objekt Q_1 in der Maske. Für Q_2 hingegen ergibt sich ein Verhältnis von $4/10 = 0,4$, wodurch dieses aus der Schattenmaske herausfällt. Obwohl beide Objekte diesselbe Form 'Quadrat' besitzen, werden diese dem Kriterium nach unterschiedlich bewertet.

Bei Verwendung von Kriterium 2 ergibt sich für die beiden o.g. Quadrate das gleiche Verhältnis, nämlich '4'. Da es sich bei Gebäudegrundflächen in der Regel nicht um Quadrate handelt (eher Rechtecke bzw. Kombinationen aus Rechtecken), ist ein zu setzender 'Schwellwert 2' größer als '4' zu wählen. In der Praxis haben ebenfalls die häufig auf Gebäuden in Gewerbegebieten anzutreffenden Dachaufbauten (Oberlichter, Klimaanlage-

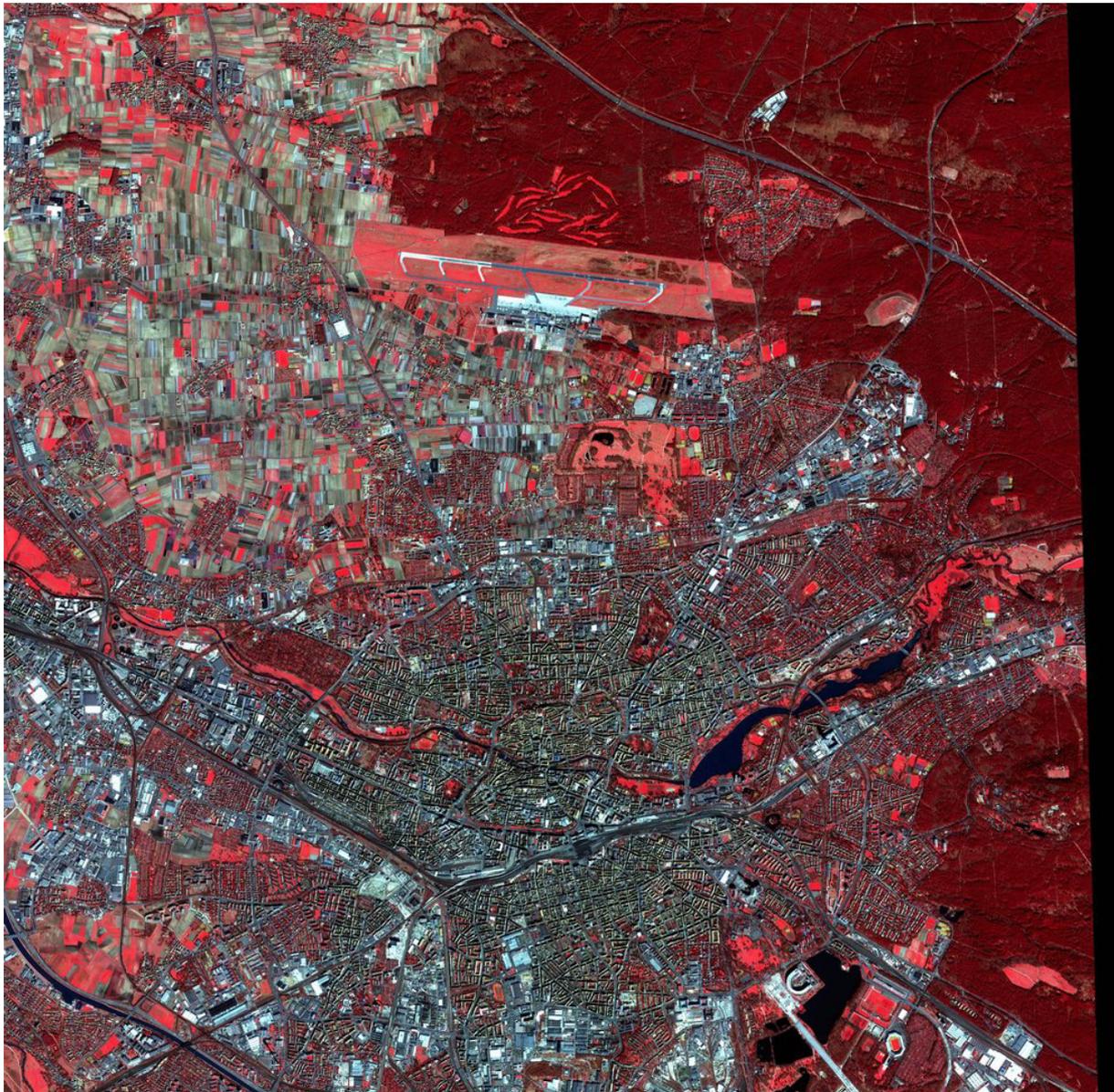


Abbildung A.13: Reflektanzbild von Nürnberg (Falschfarben-Infrarot-Darstellung). Die Szene wurde am 22.03.00 mit dem IKONOS-2-Satelliten aufgenommen.

gen o.ä.) einen Einfluß auf die Schwellwertgröße. Anhand der in Kapitel 6.1.4 verwendeten Bildszene (Abb. 6.5) ergaben sich die Schwellwerte zu:

$$\text{Form-Kriterium 1: Umfang / Fläche} < 0,68$$

$$\text{Form-Kriterium 2: Umfang / } \sqrt{\text{Fläche}} < 10$$

Abbildungen A.14 und A.15 zeigen die Anwendung des Schattenfilters unter Verwendung der verschiedenen Form-Kriterien (bei gleichen übrigen Schwellwerten).



Abbildung A.14: Ergebnis des Schattenfilters mit Form-Kriterium 1. Durch Berücksichtigung der Objektgröße werden größere Wasserflächen im Gegensatz zur Verwendung des Form-Kriteriums 2 (Abb. A.15) nicht als Schattenfläche interpretiert. Schattenflächen sind schwarz dargestellt.

Aus den Abbildungen A.14 und A.15 ist ersichtlich, daß beide Kriterien ähnliche Ergebnisse in der Zuweisung von Schattenflächen ergeben (etwa 18 % aller Bildpixel der Gesamtscene werden zu Schatten bestimmt). Allerdings fällt ein Großteil der tatsächlichen Schattenflächen des Innenstadtbereichs nach Form-Kriterium 2 aus der Schattenmaske heraus. Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Kriterien liegt darin, daß in der mit Form-Kriterium 2 bestimmten Schattenmaske (Abb. A.15) einige größere zusammenhänge



Abbildung A.15: Ergebnis des Schattenfilters mit Form-Kriterium 2. Im Gegensatz zum Ergebnis bei Verwendung des Form-Kriteriums 1 (Abb. A.14) werden Wasserflächen noch fälschlicherweise zu Schatten bestimmt. Zudem fällt ein Großteil der tatsächlichen Schattenflächen des Innenstadtbereichs (untere Bildhälfte, Mitte) aus der Schattenmaske heraus (die Gebäudeschatten sind in ihrer Form ebenfalls kompakt). Schattenflächen sind schwarz dargestellt.

Gebiete als Schatten bestimmt wurden, welche in Abb. A.14 nicht zu finden sind. Bei diesen Gebieten handelt es sich um Wasserflächen, welche aufgrund ihrer Reflektanzwerte im blauen Spektralkanal nicht als solche erkannt wurden (die Reflektanzwerte liegen oberhalb des Schwellwertes nach Kriterium in Abb. 6.7). Diese fälschlicherweise noch zu

Schattenflächen bestimmten Wasserflächen treten bei der Schattenbestimmung mit Form-Kriterium 1 nicht mehr in der Schattenmaske auf. Unter Verwendung von Form-Kriterium 2 ließe sich diese Fehlbestimmung durch Erhöhung des Schwellwertes im Form-Kriterium oder durch Erhöhung des Schwellwertes der Reflektanz im blauen Spektralkanal vermeiden (dies bedeutet allerdings auch einen Verlust bei den übrigen Schattenobjekten).

A.7.1 Quantitative Abschätzung

Aus der Schattenmaske Abb. A.14 wurden zufällig 20 Testszene bestimmt, welche nicht zu dem in Abb. 6.5 gezeigten Gewerbegebiet gehören. Diese beinhalten neben Teilen von Industriegebieten auch Bereiche von Wohngebieten, landwirtschaftlichen Nutzflächen sowie Waldgebiete. Für diese Testszene wurde jeweils eine Referenzkarte erstellt, in welcher die Schatten- (im Folgendem mit S bezeichnet) bzw. Kein-Schatten-Bereiche (im Folgendem mit KS bezeichnet) gekennzeichnet sind. Diese wurden anhand der NIR-Aufnahme der einzelnen Bildszene sowie durch Zuhilfenahme der hochauflösten panchromatischen Bildszene festgelegt.

Der Vergleich zwischen den jeweiligen Referenzkarten R und den Ergebnissen des Schattenfilters (Schattenkarte S) ist in den folgenden Abbildungen A.16 bis A.18 gezeigt. Der numerische Vergleich erfolgt durch die Angabe der Konfusionsmatrix und des aus dieser berechneten Kappa-Wertes κ . Die Konfusionsmatrix gibt dabei die Anzahl der Pixel der möglichen Permutationen von Referenz- und Schattenkarte an:

Referenz R	Schatten (S)	Kein Schatten (KS)
Schattenfilter F	Zahl ₁₁	Zahl ₂₁
Kein Schatten (KS)	Zahl ₁₂	Zahl ₂₂

Tabelle A.4: Schematische Darstellung der Konfusionsmatrix. Die Matrixelemente $Zahl_{ij}$ stehen für die Anzahl der Pixel, die in der Referenzkarte der Klasse i und durch den Schattenfilter der Klasse j zugeordnet wurden. Die Koeffizienten $Zahl_{ii}$ geben übereinstimmende Zuordnungen in beiden Karten an, d.h. eine richtige Erkennung von 'Schatten' bzw. 'Kein Schatten'. Ist die Matrix diagonal, hat man eine in dem Testgebiet vollständig korrekte Zuweisung.

Die Matrix gibt in dieser Darstellung in einer Zeile an, wie sich die Pixel einer Klasse im Ergebnis des Schattenfilters auf die Pixel der beiden möglichen Klassen der Referenzkarte verteilen. Innerhalb einer Spalte wird gezeigt, in welchem Maß sich die Pixel der Referenzkarte auf die Klassen 'Schatten' bzw. 'Kein-Schatten' der Schattenkarte verteilen. Der Wert $Zahl_{12}$ entspricht beispielsweise der Anzahl der Pixel, welche der Referenzkarte nach Schattenflächen sind, vom Schattenfilter aber nicht erkannt und der Klasse 'Kein-Schatten' zugewiesen wurde. Bei einer vollständig richtigen Zuweisung wäre die Matrix diagonal. Aus der Abweichung von diesem Idealfall läßt sich z.B. der *Kappa-Wert* als Gütemaß berechnen. Dieser berechnet sich nach:

$$\kappa = \frac{p_0 - p_z}{1 - p_z} \quad , \quad \text{mit} \quad (A.2)$$

$$p_0 = \sum_i \frac{a_{ii}}{N} \quad \text{und} \quad p_z = \sum_i \left(\sum_j \frac{a_{ij}}{N} \cdot \sum_j \frac{a_{ji}}{N} \right)$$

p_0 gibt die Anzahl der richtig klassifizierten Pixel an, p_z die Anzahl der (zufällig) falsch klassifizierten Pixel. Eine Normierung auf die Anzahl der richtig klassifizierten Pixel erfolgt durch den Nenner $1 - p_z$. Ein κ -Wert von Null entspricht einer zufälligen Verteilung von Pixeln, bei κ -Werten kleiner Null ist die Zuweisung schlechter als zufällig und deutet auf einen systematischen Fehler hin. Eine in Worte gefaßte Beschreibung des Kappawertes ist in Tab. A.5 gegeben.

Tabelle A.5: Der κ -Wert durch Worte beschrieben.

κ -Wert	Beschreibung
< 0,0	sehr schlecht
0,0 bis 0,2	schlecht
0,2 bis 0,4	akzeptabel
0,4 bis 0,6	gut
0,6 bis 0,8	sehr gut
0,8 bis 1,0	ausgezeichnet

Für unendlich große Testmengen kann ein statistischer Fehler $\sigma_\infty^2(\kappa)$ des Kappa-Wertes angegeben werden, welcher auch als gute Näherung auch für endlich Mengen benutzt werden kann. Eine Herleitung findet sich in [BFH75]. Der Fehler $\sigma_\infty^2(\kappa)$ berechnet sich nach

$$\sigma_\infty^2(\kappa) = \frac{1}{N} \left\{ \frac{p_0(1 - p_z)}{(1 - p_z)^2} + \frac{2(1 - p_0)(2p_0p_z - p_3)}{(1 - p_z)^3} + \frac{(1 - p_0)^2(p_4 - 4p_z^2)}{(1 - p_z)^4} \right\} \quad , \quad (A.3)$$

mit

$$p_3 = \sum_i \frac{a_{ii}(a_{i+} + a_{+i})}{N^2} \quad \text{und} \quad p_4 = \sum_{ij} \frac{a_{ij}(a_{j+} + a_{+i})^2}{N^3} \quad .$$

Die Abbildungen A.16 bis A.18 zeigen in einer Zeile die mit dem Schattenfilter in Verbindung mit dem o.g. Form-Kriterium 1 bestimmten Schattenflächen sowie die durch visuelle Betrachtung festgelegten Referenzkarten. Die Festlegung von Schattenflächen erfolgte durch Verwendung der ebenfalls dargestellten Bildausschnitte des 4 m NIR-Bildes sowie des 1 m Bildes im Panchromatischen. Für jede Testfläche ist außerdem die Konfusionsmatrix und der aus ihr berechnete κ -Wert angegeben.

Der Gegenüberstellung ist zu entnehmen, daß durch den Schattenfilter mit den vorgeschlagenen Parametern eine, entsprechend Tab. A.5, 'akzeptable' bis 'gute' Zuweisung von Schattenflächen erfolgt. Diese Ergebnisse gelten dabei vor allem für städtische Gebiete

(Flächen 4, 6, 8, 9, 13, 14, 18 und 19) sowie für Industrie- bzw. Gewerbegebiete (Flächen 2, 3, 7, 9, 10 und 17). Eine Ausnahme bildet das Testgebiet 1, in welchem ein Großteil der Schattenflächen nicht erkannt wird (z.T. abgeschattete Wasserflächen, welche durch den Filter auch nicht erkannt werden können, siehe Kap. 6.1.4). Dem κ -Wert nach ist die Erkennung von Schatten in Landwirtschaftsflächen (Testflächen 5, 15 und 16) bzw. Waldgebieten (Flächen 11, 12 und 20) mit 'akzeptabel' bis 'schlecht' zu werten. Dies liegt bei landwirtschaftlichen häufig daran, daß dunkler, nackter Erdboden mit Schattenflächen verwechselt wird. Bei Waldflächen bietet sich ein uneinheitlicheres Bild. Stellenweise werden in der Referenz als Schattenflächen bestimmte Bildpunkte nicht erkannt, z.T. kommt es zu einer Überstimmung von Schatten.

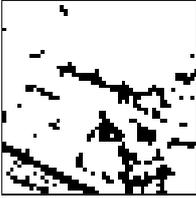
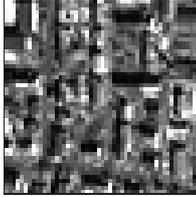
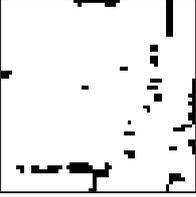
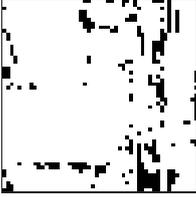
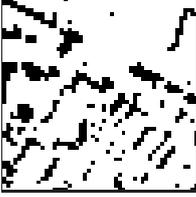
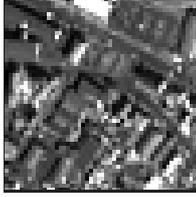
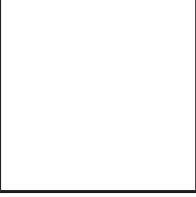
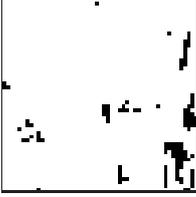
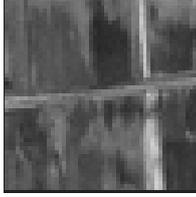
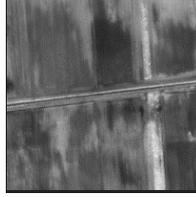
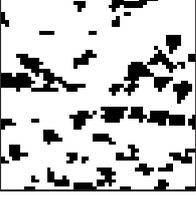
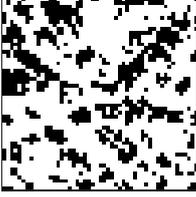
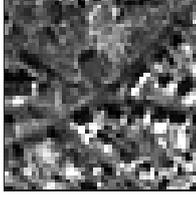
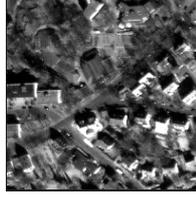
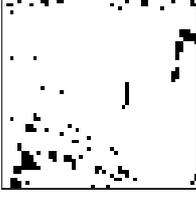
Referenz R	Filter F	4 m-NIR-Bild	1 m-Pan-Bild	Konfusionsmatrix																
				<table border="1"> <tr> <td></td> <td>R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>S</td> <td></td> <td>149</td> <td>247</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td></td> <td>669</td> <td>1536</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,05 \pm 0,02$</p>		R	S	KS	F				S		149	247	KS		669	1536
	R	S	KS																	
F																				
S		149	247																	
KS		669	1536																	
				<table border="1"> <tr> <td></td> <td>R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>S</td> <td></td> <td>300</td> <td>347</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td></td> <td>212</td> <td>1742</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,38 \pm 0,02$</p>		R	S	KS	F				S		300	347	KS		212	1742
	R	S	KS																	
F																				
S		300	347																	
KS		212	1742																	
				<table border="1"> <tr> <td></td> <td>R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>S</td> <td></td> <td>69</td> <td>206</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td></td> <td>97</td> <td>2229</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,25 \pm 0,03$</p>		R	S	KS	F				S		69	206	KS		97	2229
	R	S	KS																	
F																				
S		69	206																	
KS		97	2229																	
				<table border="1"> <tr> <td></td> <td>R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>S</td> <td></td> <td>237</td> <td>226</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td></td> <td>199</td> <td>1939</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,43 \pm 0,02$</p>		R	S	KS	F				S		237	226	KS		199	1939
	R	S	KS																	
F																				
S		237	226																	
KS		199	1939																	
				<table border="1"> <tr> <td></td> <td>R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>S</td> <td></td> <td>0</td> <td>123</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td></td> <td>0</td> <td>2478</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,0$</p>		R	S	KS	F				S		0	123	KS		0	2478
	R	S	KS																	
F																				
S		0	123																	
KS		0	2478																	
				<table border="1"> <tr> <td></td> <td>R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>S</td> <td></td> <td>304</td> <td>514</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td></td> <td>215</td> <td>1568</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,28 \pm 0,02$</p>		R	S	KS	F				S		304	514	KS		215	1568
	R	S	KS																	
F																				
S		304	514																	
KS		215	1568																	
				<table border="1"> <tr> <td></td> <td>R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>S</td> <td></td> <td>82</td> <td>64</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td></td> <td>326</td> <td>2129</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,23 \pm 0,03$</p>		R	S	KS	F				S		82	64	KS		326	2129
	R	S	KS																	
F																				
S		82	64																	
KS		326	2129																	

Abbildung A.16: Zur Schattenbewertung. Dargestellt sind die Testflächen 1 (oben) bis 7 (unten).

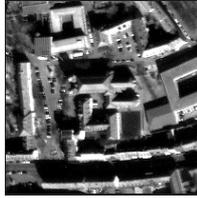
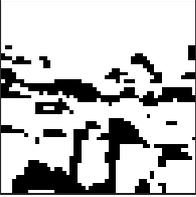
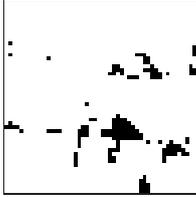
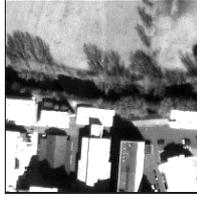
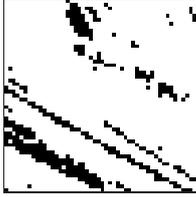
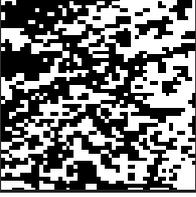
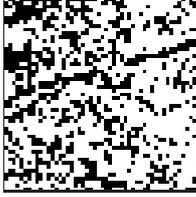
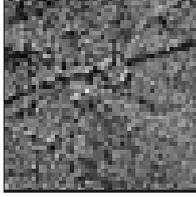
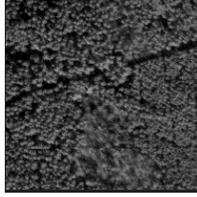
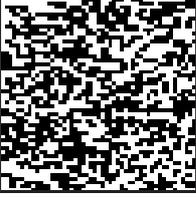
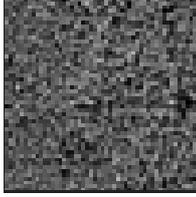
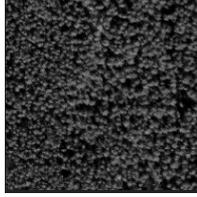
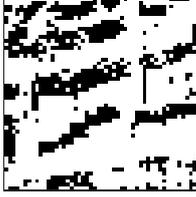
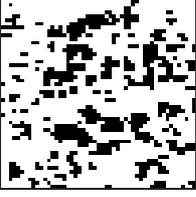
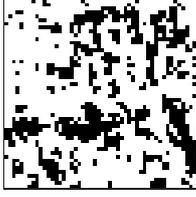
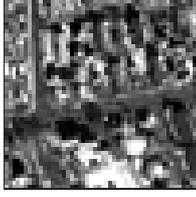
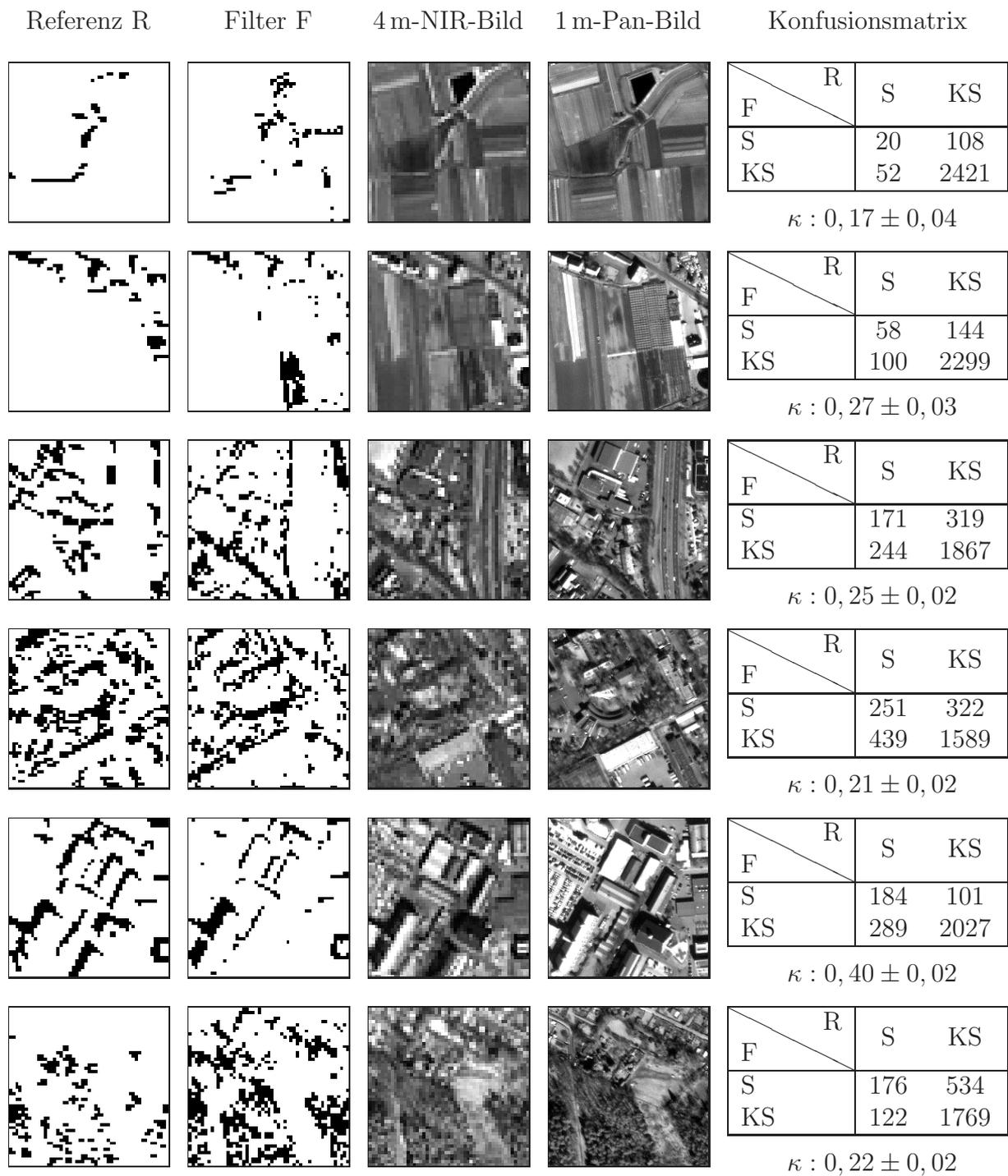
Referenz R	Filter F	4 m-NIR-Bild	1 m-Pan-Bild	Konfusionsmatrix									
				<table border="1"> <tr> <td>F \ R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>580</td> <td>330</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td>335</td> <td>1356</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,44 \pm 0,02$</p>	F \ R	S	KS	S	580	330	KS	335	1356
F \ R	S	KS											
S	580	330											
KS	335	1356											
				<table border="1"> <tr> <td>F \ R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>122</td> <td>44</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td>489</td> <td>1946</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,24 \pm 0,02$</p>	F \ R	S	KS	S	122	44	KS	489	1946
F \ R	S	KS											
S	122	44											
KS	489	1946											
				<table border="1"> <tr> <td>F \ R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>106</td> <td>247</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td>169</td> <td>2079</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,25 \pm 0,03$</p>	F \ R	S	KS	S	106	247	KS	169	2079
F \ R	S	KS											
S	106	247											
KS	169	2079											
				<table border="1"> <tr> <td>F \ R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>568</td> <td>318</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td>792</td> <td>923</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,16 \pm 0,02$</p>	F \ R	S	KS	S	568	318	KS	792	923
F \ R	S	KS											
S	568	318											
KS	792	923											
				<table border="1"> <tr> <td>F \ R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>817</td> <td>721</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td>534</td> <td>529</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,03 \pm 0,02$</p>	F \ R	S	KS	S	817	721	KS	534	529
F \ R	S	KS											
S	817	721											
KS	534	529											
				<table border="1"> <tr> <td>F \ R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>483</td> <td>260</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td>398</td> <td>1460</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,41 \pm 0,02$</p>	F \ R	S	KS	S	483	260	KS	398	1460
F \ R	S	KS											
S	483	260											
KS	398	1460											
				<table border="1"> <tr> <td>F \ R</td> <td>S</td> <td>KS</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>336</td> <td>430</td> </tr> <tr> <td>KS</td> <td>352</td> <td>1483</td> </tr> </table> <p>$\kappa : 0,25 \pm 0,02$</p>	F \ R	S	KS	S	336	430	KS	352	1483
F \ R	S	KS											
S	336	430											
KS	352	1483											

Abbildung A.17: Zur Schattenbewertung. Dargestellt sind die Testflächen 8 (oben) bis 14 (unten).



Insgesamt:

F \ R	S	KS
S	5013	5605
KS	6033	35369

$\kappa : 0,32 \pm 0,01$

Abbildung A.18: Zur Schattenbewertung. Dargestellt sind die Testflächen 15 (oben) bis 20 (unten).

Literaturverzeichnis

- [AKC⁺95] G.P. Anderson, F.X. Kneizys, J.H. Chetwynd, J. Wang, M.L. Hoke, L.S. Rothman, L.M. Kimball, R.A. McClatchey, E.P. Shettle, S.A. Clough, W.O. Gallery, L.W. Abreu, and J.E.A. Selby. FASCODE / MODTRAN / LOWTRAN : Present / past / future. In *Proceedings of the 18th Annual Review Conference on Atmospheric Transmission Models, June 6–8, 1995*.
- [AUS00] AUSLIG. (Australian Surveying & Land Information Group), Scrivener Building, Dunlop Court, Fern Hill Park, Bruce ACT 2617, PO Box 2, Belconnen ACT 2616, Australia, <http://www.auslig.gov.au/geodesy/astro/smpos.htm>, 2000.
- [Bet96] M. Betancor. Bodengebundene Fernerkundung von Eiswolken im nahen Infrarot, Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung, Reihe A: Meteorologie, Meteorologisches Institut der Universität Hamburg, 1996.
- [BFH75] Yvonne M.M. Bishop, Stephen E. Fienberg, and Paul W. Holland. *Discrete multivariate analysis: theory and practice*. MIT Press, Cambridge, Mass., 1975.
- [BG99] J.L. Bezy and G. Gourmelon. The ENVISAT medium resolution imaging spectrometer (MERIS). In *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'99, Hamburg, IEEE*, volume II, pages 1432–1434, 1999.
- [BL98] V. Blobel and E. Lohrmann. *Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse*. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 1998.
- [Bra92] S. Brandt. *Datenanalyse*. BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 1992.
- [BS63] P. Beckmann and A. Spizzichino. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, volume II. Pergamon Press, New York, 1963.
- [CCY01] J. C.-W. Chan, K.-P. Chan, and A. G.-O. Yeh. Detecting the nature of change in an urban environment: A comparison of machine learning algorithms. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67:213–225, 2001.
- [CUR96] CUReT. Columbia Utrecht Reflectance and Texture Database. World Wide Web, <http://www.cs.columbia.edu/CAVE/curet/>, 1996.

- [Dae90] Daedalus Enterprises, Inc., P.O. Box 1869, Ann Arbor, Michigan 48106, USA. *Daedalus Enterprises, Inc.: Technical Proposal, DS-1268/DS-1861 Packages*, 1990.
- [DGNK99] K.J. Dana, B.v. Ginneken, S.K. Nayar, and J.J. Koenderink. Reflectance and Texture of Real World Surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 18(1):1–34, 1999.
- [DH73] R. O. Duda and P. E. Hart. *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley, New York, 1973.
- [FDFH95] J. Foley, A. Van Dam, S. Feiner, and J. Hughes. *Computer Graphics: Principles and Practice*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1995.
- [FK93] J. Fischer and M. Kollwe. Study of cloud top height determination using a coarse spatial resolution imaging spectrometer, ESA/ESTEC-Study RFQ/3-7241/91/NL/ BI., 1993.
- [FVPB93] Stephane P. Flasse, Michel M. Verstraete, Bernard Pinty, and Carol J. Bruegge. Modeling Spectralon’s bidirectional reflectance for in-flight calibration of Earth-orbiting sensors. *The International Society for Optical Engineering*, 1938:100–108, 1993.
- [GBF93] D. P. Gibbs, C. L. Betty, and A. K. Fung. Automated Measurement of Polarized Bidirectional Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 43:97–114, 1993.
- [Geo] Geophysical & Environmental Research Corp. (GER), One Bennett Common, Millbrook, NY 12545, USA. *User manual mark V Spectroradiometer, version 1.3*.
- [Ger00] F. Gerlach. Characteristics of Space Imaging’s One-Meter Resolution Satellite Imagery Products. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, volume XXXIII, Part B1, pages 128–135, 2000.
- [GSK98] B.v. Ginneken, M. Stavridi, and J.J. Koenderink. Diffuse and specular reflectance from rough surfaces. *Applied Optics*, 37(1):130–139, 1998.
- [Hap93] B. Hapke. *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*. Cambridge University Press, Cambridge, 1993.
- [HDd90] Tagare Hemant D and Rui J.P. deFigueiredo. Non-Lambertian Shading and Photometric Stereo. In Bernd Girod, editor, *Sensing and Reconstruction of Three-Dimensional Objects and Scenes*, volume 1260, page 100. SPIE, Feb 1990.

- [Hep94] T. Hepp. Erzeugung multispektraler Reflektanzbilder zur automatisierten Bildauswertung, Diplomarbeit, Universität Hamburg, II. Institut für Experimentalphysik, CENSIS-Report-10-94, 1994.
- [HMB99] D. A. Haner, B. T McGuckin, and C.J. Bruegge. Polarization characteristics of Spectralon illuminated by coherent light. *Applied Optics*, 38(30):6350–6356, 1999.
- [Hor86] B. K. P. Horn. *Robot Vision*. MIT Press / McGraw-Hill, 1986.
- [Jäh93] B. Jähne. *Digitale Bildverarbeitung*. Springer, 1993.
- [JK94] M.E. James and S.N.V. Kalluri. The Pathfinder AVHRR land data set: an improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 15:3347–3364, 1994.
- [KHA⁺94] C. Koechler, B. Hosgood, G. Andreoli, G. Schmuck, J. Verdebout, A. Pegoraro, J. Hill, W. Mehl, D. Roberts, and M. Smith. The European Optical Geometric Facility: Technical Description and First Experiments on Spectral Unmixing. In T.I. Stein, editor, *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, IGARSS 1994*, 1994.
- [Kol96] T. Kollwe. Vergleich multispektraler Flugzeugscanneraufnahmen mit Reflektanzmessungen am Boden, Diplomarbeit, Universität Hamburg, II. Institut für Experimentalphysik, CENSIS-Report 17-96., 1996.
- [Köt00] U. Köthe. *Generische Programmierung für die Bildverarbeitung*. Ullrich Köthe; Dissertation, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, Libri Books on Demand, ISBN 3-8311-0239-2, 2000.
- [Kra90] K. Kraus. *Fernerkundung, Band 2 – Auswertung photographischer und digitaler Bilder*. Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, 1990.
- [Kra94] K. Kraus. *Photogrammetrie, Band 1 – Grundlagen und Standardverfahren*. Dümmler, Bonn, 1994.
- [KS88] K. Kraus and W. Schneider. *Fernerkundung, Band 1 – Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*. Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, 1988.
- [KSS75] K.T. Kriebel, W. Schlüter, and J. Sievers. Zur Definition und Messung der spektralen Reflexion natürlicher Oberflächen. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 43(1):43–50, 1975.
- [Kul97] Daniel Kulbach. Systematischer Vergleich von Verfahren zur überwachten Klassifikation von multispektralen Luftbildern mit Bodenaufösungen im Meterbereich, Diplomarbeit, Universität Hamburg, II. Institut für Experimentalphysik, CENSIS-Report 29-97, 1997.

- [KvDS96] J.J. Koenderink, A.J. van Doorn, and M. Stavridi. Bidirectional Reflection Distribution Function expressed in terms of surface scattering modes. In B. Buxton and R. Cipolla, editors, *Proceedings of the European Conference on Computer Vision, ECCV'96, Springer, Berlin*, pages 28–39, 1996.
- [Lab94] Labsphere Inc., P.O.Box 70, North Sutton, NH 03260, USA. *Reflectance Calibration Standards, Calibration data Target SRT-50-120, Report No.: 12611-D*, 1994.
- [LDB⁺97] M. Leroy, J. Deuze, F. Breon, O. Hautecoeur, M. Herman, J. Buriez, D. Tandre, S. Bouffies, P. Chazette, and J.L. Roujean. Retrieval of atmospheric properties and surface bidirectional reflectances over land from POLDER/ADEOS. *Journal of Geophysical Research*, 102:17023–17038, 1997.
- [LS94] S. Liang and A. H. Strahler. Retrieval of Surface BRDF from Multiangle Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 50:18–30, 1994.
- [LSS00] W. Lucht, C.B. Schaaf, and A.H. Strahler. An Algorithm for the Retrieval of Albedo from Space Using Semiempirical BRDF Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2):977–998, 2000.
- [LZY⁺00] R. Li, G. Zhou, S. Yang, G. Tuell, N.J. Schmidt, and C. Fowler. A study of the potential attainable geometric accuracy of IKONOS satellite imagery. In *Proceedings of the XIXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 16-23 July Amsterdam, The Netherlands*, volume XXXIII part B 4, pages 587–595, 2000.
- [Mei96] G. Meister. Messung der bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF) ausgewählter Oberflächen unter natürlicher Beleuchtung, Diplomarbeit, Universität Hamburg, II. Institut für Experimentalphysik, CENSIS-Report 18-96., 1996.
- [Mei00] G. Meister. Bidirectional Reflectance of Urban Surfaces, Dissertation, Universität Hamburg, II. Institut für Experimentalphysik, 2000.
- [MFS⁺72] R.A. McClatchey, W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz, and J.S. Garing. Optical Properties of the Atmosphere; AFCRL Environ. Res. Papers **411**, 108pp., 1972.
- [MJG⁺90] M. S. Moran, R. D. Jackson, F. H. Galen, P. N. Slater, R. J. Bartell, S. F. Biggar, D. I. Gellman, and R. P. Santer. Obtaining Surface Reflectance Factors from Atmospheric and View Angle Corrected SPOT-1 HRV Data. *Remote Sensing of Environment*, 32:203–214, 1990.
- [MJRS99] G. Meister, D. Jupp, A. Rothkirch, and H. Spitzer. Determination of the Angular Sensitivity of a Multispectral Line Scanner from Image Data. In

- Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'99, Hamburg, IEEE*, volume I, pages 458–460, 1999.
- [Mon98] R. Monno. Bestimmung der spektralen Reflektanzfunktion (BRDF) aus multispektralen Fernerkundungsbildern und Bodenmessungen, Diplomarbeit, Universität Hamburg, II. Institut für Experimentalphysik., 1998.
- [MRSB00] G. Meister, A. Rothkirch, H. Spitzer, and J. Bienlein. The shape of the specular peak of rough surfaces. In *Proceedings of the XIXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 16-23 July Amsterdam, The Netherlands*, volume XXXIII part B 7/2 commission VII, pages 852–860, 2000.
- [MRSB01] G. Meister, A. Rothkirch, H. Spitzer, and J. Bienlein. Large Scale Bidirectional Reflectance Model for Urban Areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(9):1927–1942, 2001.
- [MRW+98] G. Meister, A. Rothkirch, R. Wiemker, J. Bienlein, and H. Spitzer. Modeling the Directional Reflectance (BRDF) of a Corrugated Roof and Experimental Verification. In *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'98, Seattle, IEEE*, volume III, pages 1487–1489, 1998.
- [MWBS96] G. Meister, R. Wiemker, J. Bienlein, and H. Spitzer. In Situ BRDF Measurements of Selected Surface Materials to Improve Analysis of Remotely Sensed Multispectral Imagery. In *Proceedings of the XVIII. Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS 1996, Vienna*, volume XXXI part B7 of *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, pages 493–498. ISPRS/IEEE, 1996.
- [MWM+98] G. Meister, R. Wiemker, R. Monno, H. Spitzer, and A. Strahler. Investigation on the Torrance-Sparrow Specular BRDF Model. In *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'98, Seattle, IEEE*, volume IV, pages 2095–2097, 1998.
- [Nic70] F.E. Nicodemus. Reflectance Nomenclature and Directional Reflectance and Emissivity. *Applied Optics*, 9(6):1474–1475, 1970.
- [Nie00] I. Niemeyer. Änderungsdetektion und objektorientierte, wissensbasierte Klassifikation von Multispektralaufnahmen zur Unterstützung der nuklearen Verifikation, Dissertation, Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2000.
- [NIK91] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade. Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(7):611–629, July 1991.

- [NLS97] A.A. Nielsen, R. Larsen, and H. Skriver. Change detection in bi-temporal EMISAR data from kalø, denmark, by means of canonical correlation analysis. In *Proceedings of the Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen*, volume I, pages 281–287, Ann Arbor, 1997. Environmental Research Institute of Michigan.
- [ON94] Michael Oren and Shree K. Nayar. Seeing Beyond Lambert’s Law. In J.-O. Eklundh, editor, *European Conference on Computer Vision - ECCV ’94*, pages 269–280, Heidelberg, New York, 1994. Springer.
- [ON95] M. Oren and S.K. Nayar. Generalization of the Lambertian Model and Implications for Machine Vision. *International Journal of Computer Vision*, 14:227–251, 1995.
- [PV92] B. Pinty and M. M. Verstraete. On the Design and Validation of Surface Bidirectional Reflectance and Albedo Models. *Remote Sensing of Environment*, 41:155–167, 1992.
- [Qiu01] Jinhuan Qiu. An Improved Model of Surface BRDF-Atmospheric Coupled Radiation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1):181–187, 2001.
- [Reg00] N. Rega. Klassifikation von hochauflösenden optischen Multispektralbildern städtischer Gebiete mittels Fuzzy-Methoden, Universität Hamburg, II. Institut für Experimentalphysik, CENSIS-Report-36-00, 2000.
- [Ric92] R. Richter. *Radiometrische Auslegung von Sensoren und quantitative Auswertung von Fernerkundungsdaten im optischen Spektralbereich*. PhD thesis, German Aerospace Research Establishment (DLR), Oberpfaffenhofen, 1992.
- [Ric93] J. A. Richards. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer, Heidelberg, New York, 1993.
- [Ric94] R. Richter. Model SENSAT-5 SENSOR-ATMOSPHERE-TARGET, DLR-IB 552-01/94, Institut für Optoelektronik, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Wessling, D, 1994.
- [Ric97] R. Richter. On the in-flight absolute calibration of high spatial resolution spaceborne sensors using small ground targets. *International Journal of Remote Sensing*, 18(13):2817–2833, 1997.
- [RID91] K. J. Ranson, J. R. Irons, and C. S. T. Daughtry. Surface Albedo from Bidirectional Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 35:201–211, 1991.

- [RKS98] A. Rothkirch, M. Kollewe, and H. Spitzer. Calibration accuracy of aerial multispectral reflectance images and estimation of error sources. In *Proceedings of the 1'st workshop on imaging spectroscopy, Zurich, CH, ISBN 2-90885-22-0*, pages 155–163, 1998.
- [RMH⁺00] A. Rothkirch, G. Meister, B. Hosgood, H. Spitzer, and J. Bienlein. BRDF measurements on urban materials using laser light - equipment characteristics and estimation of error sources. *Remote Sensing Reviews*, 19:21–35, 2000.
- [RMSB00] A. Rothkirch, G. Meister, H. Spitzer, and J. Bienlein. BRDF measurements of urban surface materials at the EGO facility using a laser source. In *Proceedings of the XIXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 16-23 July Amsterdam, The Netherlands*, volume XXXIII part B 3/2 comission III, pages 777–784, 2000.
- [Rot97] A. Rothkirch. Feldmessung der spektralen Reflexionsfunktion (BRDF) eines Hausdaches, Diplomarbeit, Universität Hamburg, II. Institut für Experimentalphysik, CENSIS-Report-30-97, 1997.
- [SAME00] V. Salvatori, P.M. Atkinson, E.J. Milton, and D.R. Emery. Wavelength-dependent spatial variation in reflectance of 'homogeneous' ground calibration targets, Poster presentation at the XIXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 16-23 July Amsterdam, The Netherlands, *private copy of the full paper*, 2000.
- [Sch98] M. E. Schaepman. Calibration of a Field Spectroradiometer, Remote Sensing Series, vol. 31, Dep. of Geography, University of Zürich, 1998.
- [SD99] S. Sandmeier and D.W. Deering. A New Approach to Derive Canopy Structure Information for Boreal Forests Using Spectral BRDF Data. In *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'99, Hamburg, IEEE*, volume I, pages 410–412, 1999.
- [SFK⁺01] H. Spitzer, R. Franck, M. Kollewe, N. Rega, A. Rothkirch, and R. Wiemker. *Change detection with 1m resolution satellite and aerial images in urban areas*. Universität Hamburg, II. Institut für Experimentalphysik, CENSIS-Report (in preparation), 2001.
- [SHAP96] I. Solheim, B. Hosgood, G. Andreoli, and J. Piironen. Calibration and Characterization of Data from the European Goniometer Facility (EGO), Joint Research Centre European Commission, Report EUR 17268 EN, Space Application Institute, Joint Research Centre, Ispra, Italy, 1996.
- [SLHM98] N. Strugnell, W. Lucht, A. Hyman, and G. Meister. Continental-scale albedo inferred from land cover class, field observations of typical BRDFs and AVHRR data. In *Proceedings of the International Geoscience and Remote*

- Sensing Symposium IGARSS'98, Seattle, July 1998, IEEE*, volume II, pages 595–597, 1998.
- [SLT⁺99] C.B. Schaaf, W. Lucht, T. Tsang, F. Gao, N. Strugnell, L. Chen, Y. Liu, and A.H. Strahler. Prototyping the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) BRDF and albedo product. In *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'99, Hamburg, IEEE*, volume III, pages 1506–1508, 1999.
- [Spe87a] Spectron Engineering. *Operating manual - SE590 field-portable data-logging spectroradiometer*, 1987.
- [Spe87b] Spectron Engineering, West 9th avenue, Denver, Colorado 80204, USA. *SE 590 spectroradiometer - system data sheet*, 1987.
- [SS86] W. F. Staylor and J. T. Suttles. Reflection and emission models for deserts derived from Nimbus-7 ERB scanner measurements. *J. Climate Appl. Meteorol.*, 25:196–202, 1986.
- [Sto95] John C. Stover. *Optical Scattering - Measurement and Analysis*. The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, 2. edition, 1995.
- [TD93] M.E. Thomas and D.D. Duncan. Atmospheric transmission. In F.G. Smith, J.S. Accetta, and D.L. Shumaker, editors, *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook, Volume 2: Atmospheric Propagation of Radiation*. The International Society for Optical Engineering, Washington, 1993.
- [TRR⁺96] S. Tischler, H. Rothfuß, R. Richter, P. Hausknecht, A. Müller, F. Lehmann, and P. Strobl. Fernerkundung im Bereich deutscher Boddenlandschaften, Schlußbericht der DLR, BMBF 01 LF 9203/8, private Kopie der Seiten 81 bis 83, 1996.
- [TS67] K. Torrance and E. Sparrow. Theory for off-specular reflection from rough surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 57(9):1105–1114, 1967.
- [TSK99] Kazuya Takemata, Satomi Shimizu, and Yoshiyuki Kawata. Estimation of Bi-directional Reflectance Distribution Function from Land Surface using ADEOS / POLDER Image Data. In *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'99, Hamburg, IEEE*, volume II, pages 1096–1098, 1999.
- [Völ93] C. Völlger. Die Bestimmung der spektralen Reflexionsfunktion natürlicher Oberflächen bei Verwendung der Reziprozität. Dissertation, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, 1993.

- [VSJ⁺97] E.F. Vermote, N.E. Saleous, C.O. Justice, Y.J. Kauffman, J.L. Privette, L. Remer, J.C. Roger, and D. Tanre. Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation. *Journal of Geophysical Research*, 102(D14):17131–17141, 1997.
- [Wie96] R. Wiemker. Registration of airborne scanner imagery using akima local quintic polynomial interpolation. In *Proceedings of the Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco*, volume III, pages 210–219, Ann Arbor, 1996. Environmental Research Institut of Michigan.
- [Wie98] R. Wiemker. The Color Constancy Problem in Multispectral Remote Sensing – On the Impact of Surface Orientation on Spectral Signatures, Dissertation, Universität Hamburg, II. Institut für Experimentalphysik, erschienen im Logos-Verlag, Berlin, ISBN 3-89722-046-6, 1998.
- [WNW⁺85] C. L. Walthall, J. M. Norman, J. M. Welles, G. Campbell, and B. L. Blad. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetation canopies and bare soil surfaces. *Applied Optics*, 24:383–387, 1985.
- [Wol96] L.B. Wolff. Generalizing Lambert’s Law for Smooth Surfaces. In B. Buxton and R. Cipolla, editors, *Proceedings of the European Conference on Computer Vision, ECCV’96, Springer, Berlin*, pages 40–53, 1996.
- [WSH⁺97] W. Wanner, A.H. Strahler, B. Hu, P. Lewis, J.P. Muller, X. Li, C. Schaaf, and M.J. Barnsley. Global retrieval of bidirectional reflectance and albedo over land from EOS MODIS and MISR data: Theory and algorithm. *Journal of Geophysical Research*, 102:17143–17161, 1997.
- [ZZFL00] J. Zhang, Z. Zhang, H. Fan, and Z. Liu. Change detection in urban area based on stereo image pairs from different duration. In *Proceedings of the XIXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 16-23 July Amsterdam, The Netherlands*, volume XXXIII part B 4, pages 1203–1208, 2000.