Vergleich multispektraler Flugzeugscanneraufnahmen mit Reflektanzmessungen am Boden

Diplom – Arbeit

Universität Hamburg
II. Institut für Experimentalphysik

Vorgelegt von Thomas Kollewe

im Dezember 1995

Zusammenfassung

Begleitend zu einem Überflug eines Areals nahe dem Nürnberger Flughafen mit einem flugzeuggestützten 11–Kanal–Multispektralscanners des Typs Daedalus AADS 1268 in 300m Höhe wurden Bodenreferenzmessungen der Reflektanz mit dem spektral hochauflösenden Spektroradiometer IRIS durchgeführt.

Auf der Grundlage eines in [RICHTER 1994, HEPP 1994] vorgestellten Verfahrens wurden aus den Lufbildscanneraufnahmen Reflektanzbilder erzeugt, die anschließend einem Vergleich mit den direkten Bodenreflektanzmessungen unterzogen wurden.

Der Vergleich ergibt erhebliche Differenzen von bis zu 35%, die durch eine ungenaue Sensorkalibration des Daedalus-Scanners erklärt werden können. Weitere Fehler treten bei der Reflektanzbildberechnung durch vereinfachte Modellannahmen und ungenaue Parameterkenntnisse der Versuchsbedingungen auf.

Es stellte sich u.a. durch den Vergleich mit Reflektanzmessungen aus vorhergehenden Jahren die Möglichkeit heraus, den Scanner mit den Bodenreflektanzmessungen des Radiometers zu kalibrieren und so verbesserte Ergebnisse zu erhalten.

Wenn keine Bodenmessungen vorliegen, ist es, gerade für die Anwendung des multitemporalen Vergleiches, durchaus sinnvoll, durch Simulationsverfahren die Scannerbilder in Reflektanzbilder umzurechnen, um der betrachteten Oberfläche eine physikalische Größe zuzuordnen, die von der Beleuchtung und Betrachtung unabhängig ist. Es hat sich aber gezeigt, daß die erreichte Genauigkeit des in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens als Grundlage zur vollautomatischen multitemporalen Bildauswertung nur ungenügend dienen kann und für diesen Zweck Bodenreferenzmessungen oder eine Verbesserung der Reflektanzbildberechnung nötig sind.

Abstract

Simultaneously with an overflight of an area near the city of Nürnberg (FRG), performed with an imaging 11-channel airborne scanner of type Daedalus AADS 1268 flying at 300m altitude, ground reference measurements of the reflectance spectra were conducted with a spectrally high resolving spectroradiometer of type IRIS.

Based on a method developed by [RICHTER 1994, HEPP 1994] reflectance images are calculated from the aerial raw data. The airborne scanner reflectance images are compared to the ground reference reflectance measurements.

The comparison yields deviations up to 35%. They can partially be explained by an inaccurate calibration of the airborne scanner. In addition, errors appear during calculation of the reflectances due to simplifying model assumptions and an inexact knowledge of the values of the model input parameters (experimental conditions).

By comparison of the aerial reflectances to data taken in former years in the same area under comparable conditions, it can be shown that calibration of the airborne scanner with the ground reference measurements, instead with laboratory calibration, improves the results.

When no ground reference reflectance measurements are available, especially for multitemporal comparisons, it still makes sense to calculate reflectances from the aerial data by simulations e.g. after [RICHTER 1994, HEPP 1994]. Thus, physical quantities of the surfaces are generated, which are independent of illumination and registration conditions.

However, it is shown that calculation of reflectances from airborne measurements alone is not sufficient for a fully automatic multitemporal comparison. For this purpose, ground reference measurements or an improvement of the reflectances from scanner data are still necessary.

Inhalt

1 EINLEITUNG 1

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN 3

2.1 Definition der Fernerkundung 3

2.2 Definitionen und Einheiten 3

2.3 Reflektanzen 4

2.4 Fehlerberechnungen 5

3 MESSUNGEN 7

3.1 Versuchsbedingungen 7

3.2 Reflektanzmessungen am Boden 9

3.2.1 Das Spektroradiometer IRIS Mark IV 9

3.2.2 Planung und Vorbereitung 10

3.2.3 Durchführung der Bodenmessungen 12

3.3 Multispektrale Luftbildaufnahmen mit dem Flugzeugscanner 16

3.3.1 Der Daedalus AADS 1268 – Scanner 16

3.3.2 Durchführung der Überfliegung 20

3.3.3 Farbinfrarot-Aufnahmen 22

4 AUSWERTUNG 25

4.1 IRIS - Reflektanzspektren 25

4.1.1 Erzeugung von Reflektanzspektren 26

4.1.2 Gittersprungkorrektur 27

4.1.3 Detektorfunktion 29

4.1.4 Kalibrierung mit Spektralon-Normal 30

4.1.5 Fehlerabschätzung 32

4.2 Erzeugung von Reflektanzbildern aus den Daedalus–Luftbildaufnahmen 34

4.2.1 Datenformat – Daedalus AADS 1268 35

4.2.2 Datenkonvertierung – daedalus2tiff 36

4.2.3 Strahlungstransportsimulation – SENSAT–5 36

4.2.4 Reflektanzbildberechnung – ref_image 38

4.2.5 Überstrahlungseffekt – adjacen 39

4.2.6 Fehlerbetrachtung 39

5 VERGLEICH IRIS – DAEDALUS 43

5.1 Darstellung 43

5.1.1 Aufbereitung der IRIS-Spektren zum Vergleich 43

5.1.2 Aufbereitung der Daedalus-Spektren zum Vergleich 45

5.1.3 Gegenüberstellung 45

5.2 Vergleich mit Daedalus-Messungen aus Vorjahren 54

6 KLASSIFIKATION 59

7 DISKUSSION UND AUSBLICK 77

ANHANG – PROGRAMMBESCHREIBUNGEN 79

Die Programmiersprache IDL 79
daedalus2tiff 79
SENSAT–5 79
ref_image 82
adjacen 82
IDL–Hilfsroutinen 82
DANKSAGUNG 85
LITERATURVERZEICHNIS 87

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematischer Aufbau des Spektroradiometers IRIS (Quelle: Hersteller, Fa. GER, USA) 9
Abb. 2: Spektrale Auflösung des IRIS-Spektrometers 10
Abb. 3: Beispiel für die Meßortauswahl anhand der Daedalus-Scanner–Bilder 1992 mit den zugehörigen Spektren (DN = Digital Number = Grauwert) und deren Fehlerbalken 11
Abb. 4: Positionen der Meßorte auf der Landkarte (siehe auch Abb. 5 und Abb. 6): 1. neugebautes Flughafenvorfeld (West), noch nicht in Betrieb 2. Asphaltstreifen zwischen altem Vorfeld und Rasenfläche 3. Tennisplatz 4. Kunstrasen – Fußballfeld 5. Straßenasphalt im Gewerbegebiet 6. Naturrasen – Fußballfeld 12
Abb. 5: Positionen der Meßorte 1–4 (Flughafenvorfeld, Asphalt, Tennisplatz, Kunstrasen) auf den Luftbildern von 1994 (300m Flughöhe, Daedalus-Kanal 3, Kontrastverstärkt) 13
Abb. 6: Wie Abb. 5, jedoch Positionen der Meßorte 5 (Straße) und 6 (Rasen). 14
Abb. 7: Meßaufbau des IRIS-Spektrometers (mit Herrn Hausknecht, DLR) auf dem Flughafenvorfeld (Meßort 1) 15
Abb. 8: Scan-Kopf und Spektrometereinheit des Daedalus AADS 1268 16
Abb. 9: IRIS-Messung „Kunstrasen“. Fett: Bereiche der Daedalus-Kanäle 18
Abb. 10: Apparatefunktionen der Daedalus AADS 1268 – Detektoren 19
Abb. 11: Flugrouten der Überfliegung am 18.10.1994 (T=300m, S=1800m) 20
Abb. 12: Auszug aus einem Flugstreifen in 300m Flughöhe (Spektralkanal 3), mit Gewerbegebiet, Kleingärten und Landschaftsschutzgebiet (oben = Osten) 21
Abb. 13: Zeiss D - Filtercharakteristik 22
Abb. 14: Spektrale Empfindlichkeit des Farbinfrarotfilms KODAK 2443 23
Abb. 15: Flußdiagramm zur Erzeugung von absoluten Reflektanzspektren aus den IRIS-Messungen 26
Abb. 16: Dunkelströme der beiden Meßkanäle (Rohmeßwert und mit 50-Punkt-Mittelwertbildung) 27
Abb. 17: Gittersprungkorrektur am Beispiel der Kunstrasenmessung 28
Abb. 18: relative Reflektanz der Messung „Kunstrasen“ (Datei „np13tar_s_D“) 29
Abb. 19: Detektorfunktion des IRIS-Spektrometers. Gestrichelt: Original-Detektorfunktion DLR (siehe Text). 30
Abb. 20: Messung zur Eichung der $BaSO_4$-Referenzfläche mit Hilfe der Spektralon-Referenzfläche (Quelle: DLR) 31
Abb. 21: Absolute Reflektanz der Spektralon-Referenzfläche (Quelle: Labsphere) 31
Abb. 22: Spektraler Variationskoeffizient des IRIS-Spektrometers, bestimmt aus 5 Messungen auf dem Flugafengelände (Asphalt) 33
Abb. 23: Messung an einem He-Ne-Laser 33
Abb. 24: Flußdiagramm zur Erzeugung von Reflektanzbildern aus den Daedalus-Scannerbildern 35
Abb. 25: Aufzeichnungsformat der Daten des Daedalus AADS 1268 für jeden Kanal 36
Abb. 26: Überstrahlungseffekt 39
Abb. 27: Daedalus-Messungen an der 2m-Ulbrichtkugel (mit unterdrücktem Maßstab) 41
Abb. 28: IRIS-Messung (Kunstrasen) und Mittelung (graue Punkte) der IRIS-Daten über die Bereiche der Daedalus-Kanäle (schwarze Balken). Die fettgezeichnete Kurve verbindet diese Punkte zur besseren Anschauung. 44
Abb. 29: Ausgabe des Programmes „clippolyzoom“ für Meßort 5 (siehe Pfeil, links unten: Reflektanzspektrum mit Fehlerbalken) 45
Abb. 30: Gegenüberstellung der Messungen IRIS – Daedalus 47

Abb. 31: Statistischer Zusammenhang zwischen IRIS- und Daedalus-Messungen (gestrichelt = optimale Übereinstimmung) 48
Abb. 32: Gegenüberstellung der Messungen IRIS – Daedalus. Korrektur der Daedalus-Spektren mit allen IRIS-Testflächen 50
Abb. 33: Messung von Rasen und Tennisplatz 51
Abb. 34: Gegenüberstellung der Messungen IRIS – Daedalus. Korrektur der Daedalus-Spektren mit ausgewählten IRIS-Testflächen (*) 53
Abb. 35: Gegenüberstellung der Jahre 1991, 1992 und 1994 und der IRIS-Meßdaten 54
Abb. 36: Gegenüberstellung der Jahre 1991, 1992 und 1994 und der IRIS-Meßdaten (die Daedalus-Daten von 1994 mit den IRIS-Bodenmessungen korrigiert) 55
Abb. 37: Entwicklung der Meßfläche „Flughafen-Asphalt“ von 1991, 92 und 94 (Kanal 3) 56
Abb. 38: Reflektanzspektren des Meßortes „Flughafen–Asphalt“ von 1991, 92 und 94 57
Abb. 39: Szene aus dem Industriegebiet Nürnberg 1991, 1992 und 1994 (v.o.n.u.) mit den Klassifikationstestpunkten im Bild 1991 61
Abb. 40: Klassifikation mit 3 Klassen 63
Abb. 41: Klassifikation mit 5 Klassen 65
Abb. 42: Klassifikation mit 7 Klassen 67
Abb. 43: Klassifikation mit 9 Klassen 69
Abb. 44: Klassifikation mit 11 Klassen 71
Abb. 45: Klassifikation mit 13 Klassen 73
Abb. 46: Eingabemaske eines neuen Parametersatzes in SENSAT5 80
Abb. 47: Graphische Benutzeroberfläche von SENSAT5 81
Abb. 48: Maske zum Ändern eines Parametersatzes 81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gemessene meteorologische Größen 7
Tabelle 2: Gemessene Luftfeuchtigkeit 8
Tabelle 3: Spektralbereiche der Daedalus AADS 1268 – Detektoren 17
Tabelle 4: Farbempfindlichkeit des Farbinfrarotfilms KODAK 2443 22
Tabelle 5: Auszug aus der Datei „np13tar_s_D“ 29
Tabelle 6: SENSAT-5 – Eingabedaten 37
Tabelle 7: Auszug aus einer ATM-Datei (Kanal 6, 1992) 38
Tabelle 8: Korrekturfaktoren für die Daedalus-Reflektanzberechnung 52
Tabelle 9: Multitemporaler Vergleich der Klassifikation 75
Tabelle 10: Standard-Radiosondenprofil-Datei (standard.prf) 80

1 Einleitung

Diese Diplomarbeit wurde am II. Instituts für Experimentalphysik in der Projektgruppe CENSIS bearbeitet. Ziel der Gruppe CENSIS (**Cen**ter for **S**cience and **I**nternational **S**ecurity) ist es, Fragestellungen aus dem Grenzbereich zwischen Naturwissenschaft und internationaler Sicherheit in interdisziplinären Forschungsprojekten zu bearbeiten.

Das Rahmenprojekt dieser Arbeit beschäftigt sich mit den physikalischen Grundlagen der Fernerkundung, mit dem übergeordneten Ziel, Methodenentwicklung für eine Verifikation von konventioneller Abrüstung in Europa mittels Fernerkundung zu betreiben [CENSIS 1995].

Ein Schritt in diese Richtung ist die Erarbeitung einer Möglichkeit zur automatisierten Erkennung zeitlicher Veränderungen von Objekten (change-detection), wie Häusern, Flughäfen, Straßen etc., die mit Hilfe von multispektralen, bildgebenden Scannern aus der Luft oder vom Weltraum aus aufgenommen werden können. Um aber Objekte zu erkennen, wird zunächst ein Verfahren benötigt, um die einzelnen Bildelemente (Pixel) der Scanner–Daten spektral einer bestimmten Objektklasse zuzuordnen. Dieses Klassifizierungsverfahren sollte auch in der Lage sein, mit nur einem Satz von Eichklassen Luftbild–Scanner–Aufnahmen zu verarbeiten, die zu verschiedenen Zeitpunkten gemacht wurden. Um ein solches Verfahren zu ermöglichen, müssen die Objekte durch Größen beschrieben werden, die unabhängig von Beleuchtungsrichtung und -stärke und von atmosphärischen Bedingungen sind. Dieses führt zur Charakterisierung der Objekte durch ihre Reflexionseigenschaften (Reflektanzen). Zur Berechnung der Reflektanzen aus Scanner–Daten dient u.a. das Programm SENSAT–5.

In den Jahren 1991 und 1992 wurden Überfliegungen des Nürnberger Flughafens und Umgebung durchgeführt, die exemplarisches Bildmaterial lieferten, um sich an der Realisierung eines solchen Verfahrens zu versuchen.

Hierbei konnte auf die Grundlagen der Reflektanzbildberechnungen von [HEPP] zurückgegriffen werden, wobei offen bleiben mußte, mit welchem Fehler diese Berechnungen behaftet sind. In dieser Arbeit wurde versucht, hierfür mit Hilfe von Referenzmessungen am Boden eine Antwort zu finden und ggf. Vorschläge für eine verbesserte Reflektanzbildbestimmung anzugeben.

Während einer erneuten Überfliegung im Oktober 1994 wurden zur Kalibration der Luftbild–Scanner–Daten zusätzlich Bodenmessungen mit einem hochauflösenden Spektroradiometer an ausgewählten Orten durchgeführt.

Die Aufnahmegeräte wurden von der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR, Institut für Optoelektronik) in Weßling bei München bereitgestellt und betrieben.

Die Arbeit befaßt sich zu Beginn mit einigen theoretischen Grundlagen zur Fernerkundung und zum Begriff der Reflektanz. Anschließend folgt die Darstellung der Vorbereitungen der Messungen und der Versuchsbedingungen, unter denen diese durchgeführt wurden. Mit den Berechnungen der absoluten Reflektanzen aus den Scanner- und Bodenmessungen beschäftigt sich das darauf folgende Kapitel. Es folgt ein Abschnitt, der sich mit der weiteren Verarbeitung der Meßwerte aufzeigt, um die Bodenmessungen mit Luftscanneraufnahmen vergleichen zu können. Dann wurde beispielhaft eine Klassifikation an einer ausgewählten Szene durchgeführt. Zum Abschluß enthält diese Arbeit noch Diskussionspunkte und einige Ausblicke.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Definition der Fernerkundung

Eine gängige Definition des Begriffs *Fernerkundung* ist die berührungslose Messung (rückgestreuter und/oder emittierter) elektromagnetischer Strahlungen eines sehr weit entfernten Objektes [STRATHMANN 1990]. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Arten von Fernerkundung:

- *aktive* Fernerkundung: Das Objekt wird mit elektromagnetischer Strahlung von der Meßapparatur aktiv bestrahlt, und die rückgestreute und emittierte Strahlung wird gemessen.
- *passive* Fernerkundung: Es wird nur die vom Objekt emittierte Strahlung und die Rückstreuung der natürlichen Strahlung (Sonne, Himmel) gemessen.

Der in dieser Arbeit benutzte multispektrale Luftbildscanner ist ein Beispiel für einen Sensor der passiven Fernerkundung. Passive Fernerkundungssensoren messen die elektromagnetische Strahlung meistens in vielen spektralen Bereichen, nicht nur im sichtbaren Bereich, sondern vor allem auch im nahen und thermischen Infrarot. Damit läßt sich, z.B. anhand eines steilen Anstiegs der Strahlung im nahen Infrarotbereich, Vegetation sehr leicht von unbelebten Objekten unterscheiden.

Ein Beispiel für einen aktiven Sensor ist ein Radarsatellit, dessen emittierte Radarstrahlung von den Objekten reflektiert und dann vom Detektor gemessen wird. Ein solcher Sensor ist im Gegensatz zu den passiven Sensoren nicht auf äußere Bedingungen, wie z.B. Sonnenstrahlung oder wolkenlosen Himmel angewiesen.

2.2 Definitionen und Einheiten

Zur Beschreibung einer elektromagnetischen Strahlung ist u.a. der *Strahlungsfluß*

$$\Phi = \frac{dW}{dt} \quad \text{in W} \qquad \text{(Gleichung 2.1)}$$

als differentielle Strahlungsenergie dW, die eine beliebige Fläche pro Zeiteinheit dt in eine Richtung durchläuft, definiert. Bezogen auf eine Flächeneinheit da ergibt sich die *Strahlungsflußdichte* (bei einfallender Strahlung: *Bestrahlungsstärke*)

$$E = \frac{d\Phi}{da} \quad \text{in } \frac{\text{W}}{\text{m}^2}. \qquad \text{(Gleichung 2.2)}$$

Betrachtet man die Strahlungsflußdichte in einem bestimmten Raumwinkel, erhält man die *Strahldichte*

$$L = \frac{dE}{d\Omega} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega\, da \cdot \cos\theta} \quad \text{in } \frac{\text{W}}{\text{m}^2\,\text{sr}}, \qquad \text{(Gleichung 2.3)}$$

wobei $\cos\theta$ den Winkel zwischen der Flächennormalen von da und der Betrachtungsrichtung angibt, d.h. $\cos\theta\, da$ ist das Flächenelement senkrecht zur Beobachtungsrichtung. Für ein Wellenlängenintervall $d\lambda$ ergibt sich schließlich die *spektrale Strahldichte*

$$L_\lambda = \frac{d^3\Phi}{d\Omega\, da \cdot \cos\theta \cdot d\lambda} \quad \text{in} \quad \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\,\mathrm{sr}\,\mu\mathrm{m}}. \qquad \text{(Gleichung 2.4)}$$

Umgekehrt erhält man durch Integration über alle Einfallswinkel die *spektrale Strahlungsflußdichte* oder *spektrale Bestrahlungsstärke (Irradiance)*:

$$E_\lambda = \int_\Omega L_\lambda \cos\theta\, d\Omega. \qquad \text{(Gleichung 2.5)}$$

Eine winkelunabhängige spektrale Strahldichte nennt man isotrop. Es ergibt sich dann aus Gleichung 2.5 für einen isotropen (*Lambert-*) Reflektor

$$E_\lambda = L_\lambda \cdot \int \cos\theta\, d\Omega \qquad \text{(Gleichung 2.6)}$$

Diese Definitionen sind nachzulesen in [BAKAN 1988] und [LILJEQUIST 1984].

2.3 Reflektanzen

Für einen bestrahlten Lambert-Reflektor (Objektoberfläche) läßt sich mit geeigneten Meßgeräten die absolute spektrale Strahldichte der reflektierten Strahlung bestimmen. Wird dieser Reflektor nun von verschiedenen Quellen bestrahlt, so ergeben sich unterschiedliche, quellenabhängige Strahldichtespektren der rückgestreuten Strahlung. Um eine physikalisch Größe zu erhalten, die den Reflexionsvorgang am Reflektor unabhängig von der Beleuchtungsquelle beschreibt, definiert man die *Reflektanz* (oder den *Reflexionsgrad*) $\rho(\lambda)$ wie folgt:

$$\rho(\lambda) = \pi \frac{L_R(\lambda)}{E_S(\lambda)}. \qquad \text{(Gleichung 2.7)}$$

Diese Größe beschreibt das Verhältnis der Strahldichte $L_R(\lambda)$ der reflektierten Strahlung zur einfallenden Strahlungsflußdichte $E_S(\lambda)$, ist somit ein dimensionsloser Wert, der die Reflexionseigenschaften der Oberfläche unabhängig von einer Strahlungsquelle darstellt.

Erst durch die Beschreibung von Objekten (z.B. Hausdächer, Straßen, Wiesen etc.) mit Hilfe der Reflektanz, wird es möglich, multispektrale Luftaufnahmen zu vergleichen, die bei unterschiedlichen Bedingungen (Sonnenstand, Atmosphärenparameter etc.) aufgenommen wurden.

2.4 Fehlerberechnungen

Zur Berechnung des Fehlers s_f (Standardabweichung) einer Größe $f = f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, die aus anderen Größen berechnet wurde dient das *Fehlerfortpflanzungsgesetz*. Hierbei müssen die Mittelwerte $\overline{x_i}$ der Ausgangsgrößen x_i und deren Standardabweichungen s_i bekannt sein. Es ergibt sich dann

$$s_f = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} (\overline{x_i}) \right)^2 \cdot s_i^2} \qquad \text{(Gleichung 2.8)}$$

3 Messungen

Dieses Kapitel befaßt sich mit der Durchführung der Messungen. Es werden Versuchsbedingungen und -durchführung sowohl für das IRIS-Spektroradiometer als auch für den Daedalus-Luftbildscanner dargestellt. Diesem Kapitel ist zu entnehmen, wann, wo und zu welchem Zeitpunkt gemessen wurde.

3.1 Versuchsbedingungen

Für die Berechnung der Reflektanzen aus den multispektralen Luftbildern, benötigt man zur Atmosphärenkorrektur noch Daten über die Luft- und Wetterverhältnisse. Einige meteorologische Größen für den Tag der Messungen werden beim Flughafen Nürnberg erfragt. Diese für den Flugverkehr wichtigen Daten werden dort fortlaufend protokolliert.

Meteorologische Größe	Uhrzeit	Wert
Sichtweite	12.00 h	30 km
Wind	10.50 h 11.20 h	4,6 m/s aus 120° Ost-Süd-Ost 4,6 m/s aus 130° Ost-Süd-Ost
Bewölkung	12.00 h	2/8 Cirrus in 8 km Höhe
Luftdruck	10.50 h 11.20 h	1023 hPa 1022 hPa

Tabelle 1: Gemessene meteorologische Größen

Außerdem wurde während der Messungen zu drei verschiedenen Zeitpunkten die relative Luftfeuchte r mit zwei verschiedene Methoden bestimmt.

1. Mit einem Psychrometer: Es wurde Trocken- und Feuchttemperatur gemessen. (T_{tr} bzw. T_f).
2. Mit einem Haarhygrometer: Die relative Feuchte konnte direkt abgelesen werden.

Nach [GRAßL 1989] erfolgt die Berechnung der relativen Luftfeuchte aus den Psychrometerdaten T_{tr} und T_f mit Hilfe der Magnus-Formel für den Sättigungsdampfdruck p_{satt} bei einer bestimmten Temperatur T (in °C)

$$p_{satt}(T) = 6{,}107 \cdot 10^{\frac{7{,}5T}{237+T}} \quad \text{in hPa}. \qquad \text{(Gleichung 3.1)}$$

Die absolute Feuchte bei Sättigung f_{satt} ergibt sich dann mit der idealen Gasgleichung zu

$$f_{satt}(T) = \frac{p_{satt}(T)}{R_w \cdot T}, \qquad \text{(Gleichung 3.2)}$$

mit $R_w = \frac{R}{M_{H_2O}} = 0{,}46145 \frac{J}{gK}$, der Gaskonstanten für Wasserdampf, und daraus mit den Psychrometerdaten

$$f(T_{tr}) = f_{satt}(T_f) - \frac{\rho_L \cdot c_p}{\eta} \cdot (T_{tr} - T_f). \qquad \text{(Gleichung 3.3)}$$

mit η als spezifische Verdampfungswärme. Für Temperaturen etwas unterhalb Zimmertemperatur und in Meereshöhe ist

$$\frac{\rho_L \cdot c_p}{\eta} \approx 0{,}5 \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{m}^3\mathrm{K}}. \qquad \text{(Gleichung 3.4)}$$

Die relative Feuchtigkeit ist schließlich

$$r = \frac{f(T_{tr})}{f_{satt}(T_{tr})}. \qquad \text{(Gleichung 3.5)}$$

Psychrometer				Haarhygrometer
Uhrzeit	T_{tr} [°C]	T_f [°C]	r [%]	r [%]
10.50	7,0	3,4	55,7	56,5
11.25	6,6	3,0	54,9	52,5
11.45	7,2	3,2	51,3	49,5

Tabelle 2: Gemessene Luftfeuchtigkeit

Die Differenzen der in Tabelle 2 aufgeführten Ergebnisse der zwei alternativen Luftfeuchtigkeitsmessungen liegen sicherlich innerhalb der Fehlergrenzen, die mit 5% für das Haarhygrometer und mit 5-10% für das Psychrometer angenommen werden können.

3.2 Reflektanzmessungen am Boden

3.2.1 Das Spektroradiometer IRIS Mark IV

Das IRIS Mark IV (Hersteller: GER, USA), im folgenden nur IRIS genannt, ist ein hochauflösendes Spektroradiometer mit einem großen Spektralbereich, das speziell für Bodenmessungen für die unterschiedlichsten Anwendungen konzipiert ist. Ein großer Vorteil dieses Gerätes besteht darin, daß es in der Lage ist, direkt Reflektanzspektren als Meßwerte zu liefern. So kann eine aufwendige und fehlerbehaftete absolute Laborkalibration in spektralen Strahldichten entfallen (siehe auch [HAUSKNECHT 1994], [WERNER 1990] und [IRIS]).

Das Gerät besitzt folgenden Eigenschaften:

- Spektralbereich 300 – 3000 nm in 862 Kanälen
- Auflösung 2 nm, 4 nm, 6 nm (3 Gitter)
- Meßgeschwindigkeit ~ 30 Sekunden pro Spektrum
- Größe Scanneinheit: ca. 40x40x25 cm
  Auswerterechner in einem Koffer (Notebook)
  Stativ: ca. 1 m hoch, 10 kg schwer

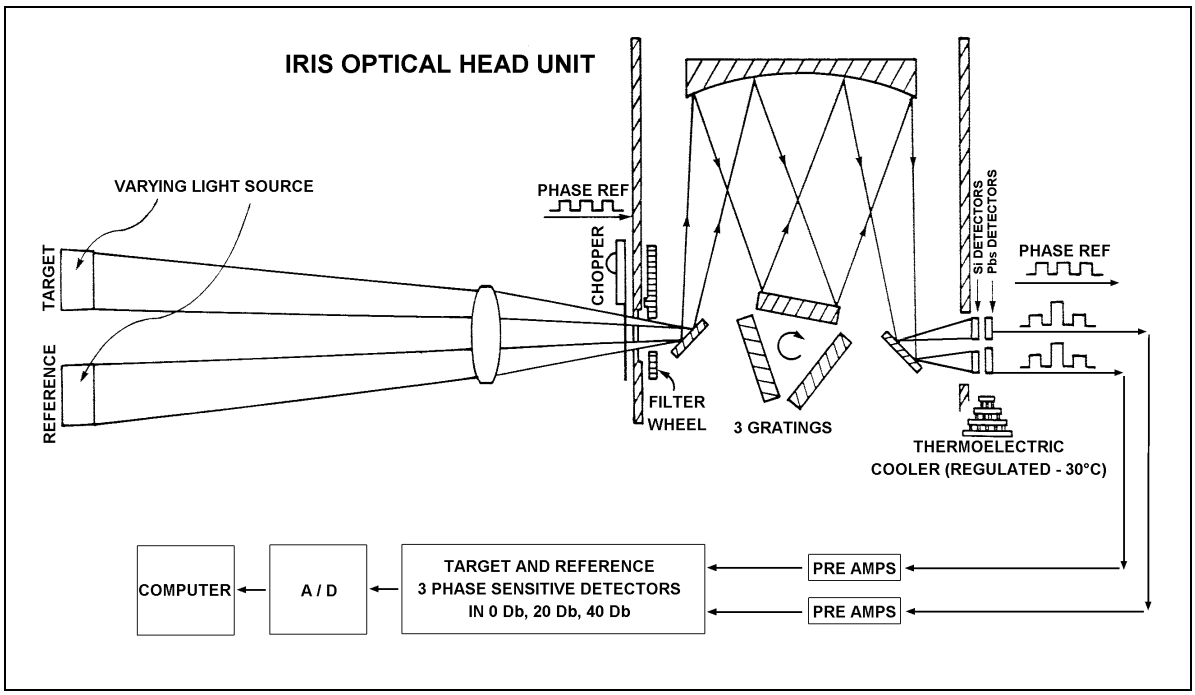


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Spektroradiometers IRIS (Quelle: Hersteller, Fa. GER, USA)

Das IRIS ist in der Lage, Spektren zweier unterschiedlicher Flächen gleichzeitig zu registrieren, so daß es möglich ist, **gleichzeitig** eine Zielfläche (target) und eine Referenzfläche (reference) aufzunehmen. Das hat den Vorteil, daß kein Zeitversatz zwischen diesen beiden Messungen entsteht. Die Messung der Referenzfläche dient zur Eichung der Messung der Zielfläche (bzw. zur Erzeugung von relativen Reflektanzen). Ein Zeitversatz würde einen Fehler durch in dieser Zeit aufgetretene Veränderungen der Beleuchtung nach sich ziehen.

Wie aus Abb. 1 ersichtlich ist, wird der große spektrale Meßbereich durch Umschalten auf drei verschiedene Spiegelgitter realisiert, die unterschiedliche spektrale Auflösungsvermögen besitzen. Abb. 2 wurde aus den spektralen Stützstellen einer (beliebigen) Messung erzeugt.

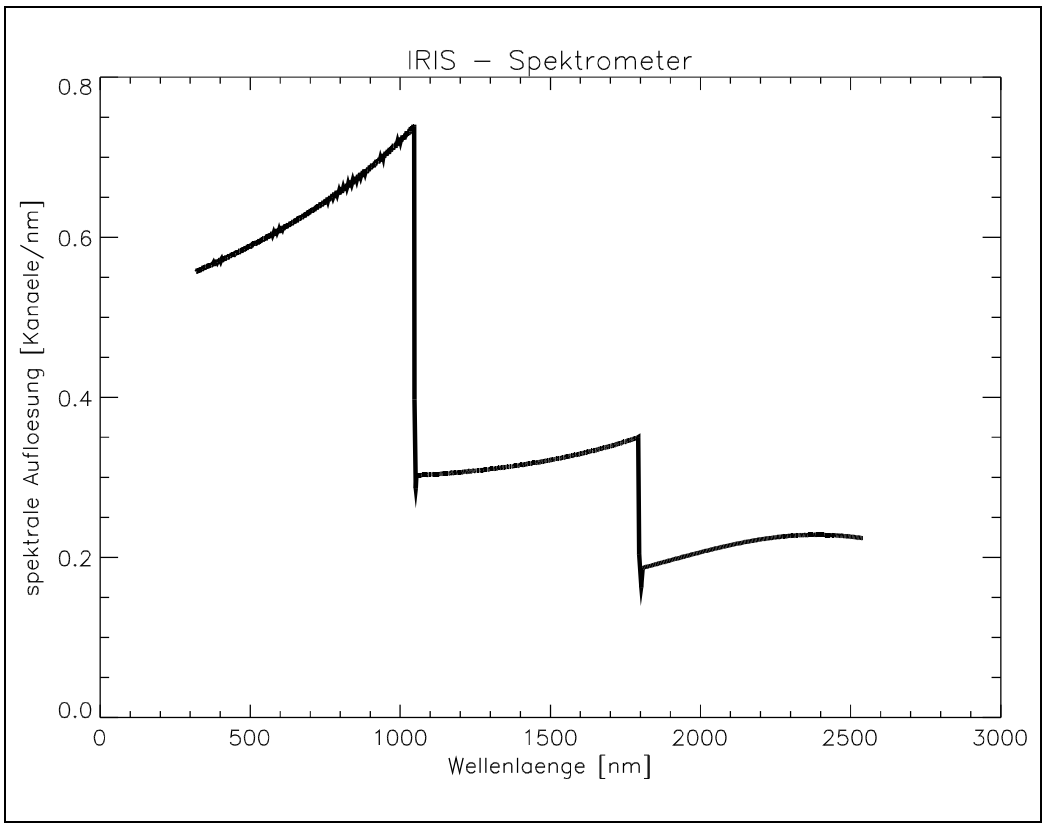


Abb. 2: Spektrale Auflösung des IRIS-Spektrometers

3.2.2 Planung und Vorbereitung

Zur Vorbereitung der Messungen am Boden wurden anhand von Scanner–Bildern der Überfliegung 1992 ca. 30 Meßorte ausgewählt, von denen zu erwarten war, daß sie sich zur Kalibration eignen. Die Meßorte sollten nach Möglichkeit folgende Bedingungen erfüllen:

- sehr homogen (kleine Streuung der umgebenden Pixel)
- möglichst großflächig (mehrere Pixel auf dem Scanner–Bild)
- gut zugänglich (mit dem IRIS erreichbar)
- möglichst verschieden von allen anderen ausgewählten Flächen (große Spektrenvielfalt)

Abb. 3 zeigt beispielhaft eine Auswahl von Flächen, wie sie am Bildschirm vorgenommen wurde. Es ist leicht zu erkennen, daß die großen, künstlichen Flächen (Nr. 1 bis 4, Dach und asphaltierte Höfe) eine deutlich kleinere statistische Streuung aufweisen, als eine kleine Fläche (Nr. 5, Straße), oder eine natürliche (Nr. 6, Wiese). Fläche Nr. 3 ist aber dennoch ungünstig, da ein Hausdach mit dem IRIS nicht gut zugänglich ist.

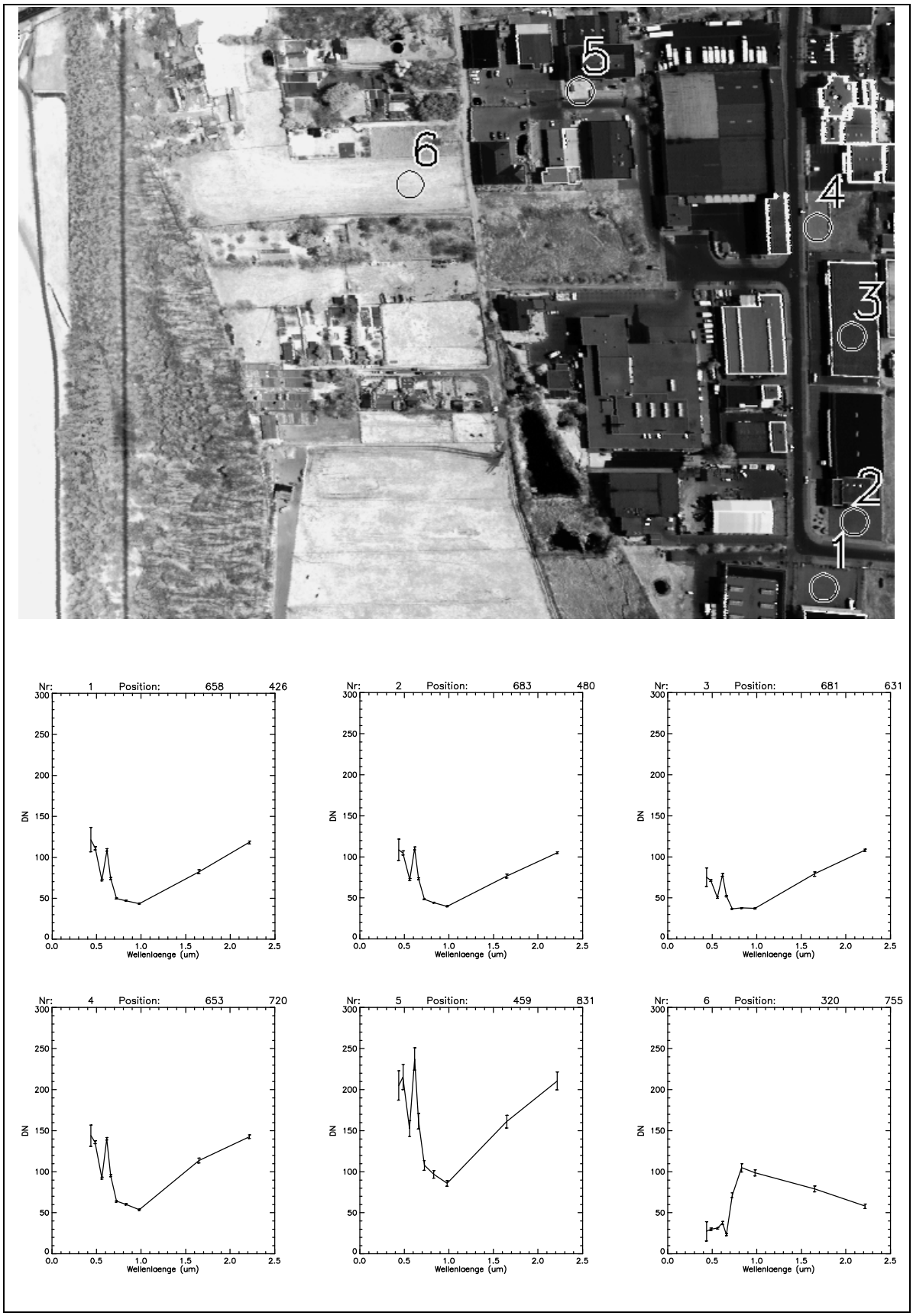


Abb. 3: Beispiel für die Meßortauswahl anhand der Daedalus-Scanner–Bilder 1992 mit den zugehörigen Spektren (DN = Digital Number = Grauwert) und deren Fehlerbalken

Eine anschließende Ortsbesichtigung ergab, daß 24 der ca. 30 ausgesuchten Meßorte die Bedingungen nicht erfüllen konnten, weil sie entweder gar nicht zu erreichen waren (kein Zuweg), oder sich von bereits ausgewählten Testflächen spektral nicht bedeutend unterschieden haben.

Zur Vorbereitung der Messungen gehörte auch ein Besuch des Instituts für Optoelektronik der DLR (Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt) in Weßling bei München, das die Messungen durchführen sollte. Hierbei wurden Informationen über das IRIS Spektroradiometer, die Bedienung, die Kalibration und das Meßdatenformat eingeholt.

3.2.3 Durchführung der Bodenmessungen

Am 18.10.1994 von 11^{00}h bis 12^{15}h wurde, wie schon 1991 und 1992 [HEPP 1994], eine Überfliegung des Nürnberger Flughafens und angrenzender Gebiete durchgeführt, um mit dem Luftbild–Scanner Daedalus AADS 1268 Messungen zu machen. Zusätzlich zu den Flugzeugmessungen zwischen 10^{45}h und 15^{00}h sind an diesem Tage an 6 Orten insgesamt 24 Reflektanzspektren mit dem Spektroradiometer IRIS am Boden aufgenommen worden. Abb. 4, Abb. 5 und Abb. 6 zeigen die Punkte, an denen gemessen wurde (in zeitlicher Reihenfolge).

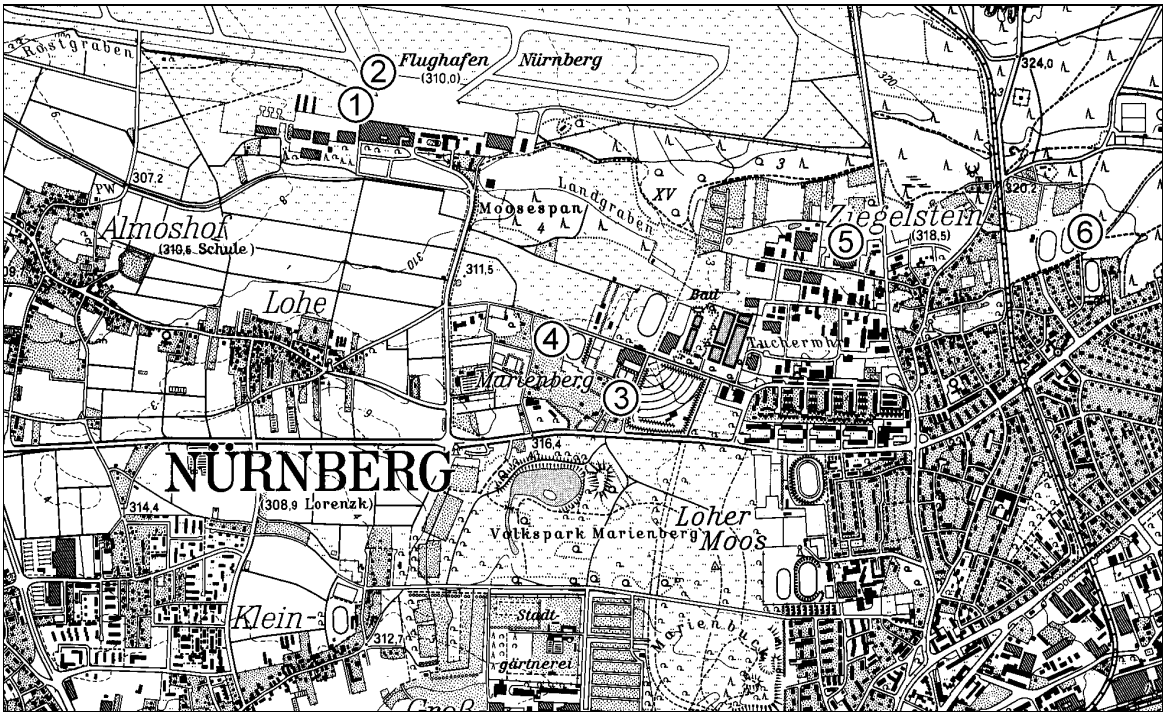


Abb. 4: Positionen der Meßorte auf der Landkarte (siehe auch Abb. 5 und Abb. 6):

1. **neugebautes Flughafenvorfeld (West), noch nicht in Betrieb**
2. **Asphaltstreifen zwischen altem Vorfeld und Rasenfläche**
3. **Tennisplatz**
4. **Kunstrasen – Fußballfeld**
5. **Straßenasphalt im Gewerbegebiet**
6. **Naturrasen – Fußballfeld**

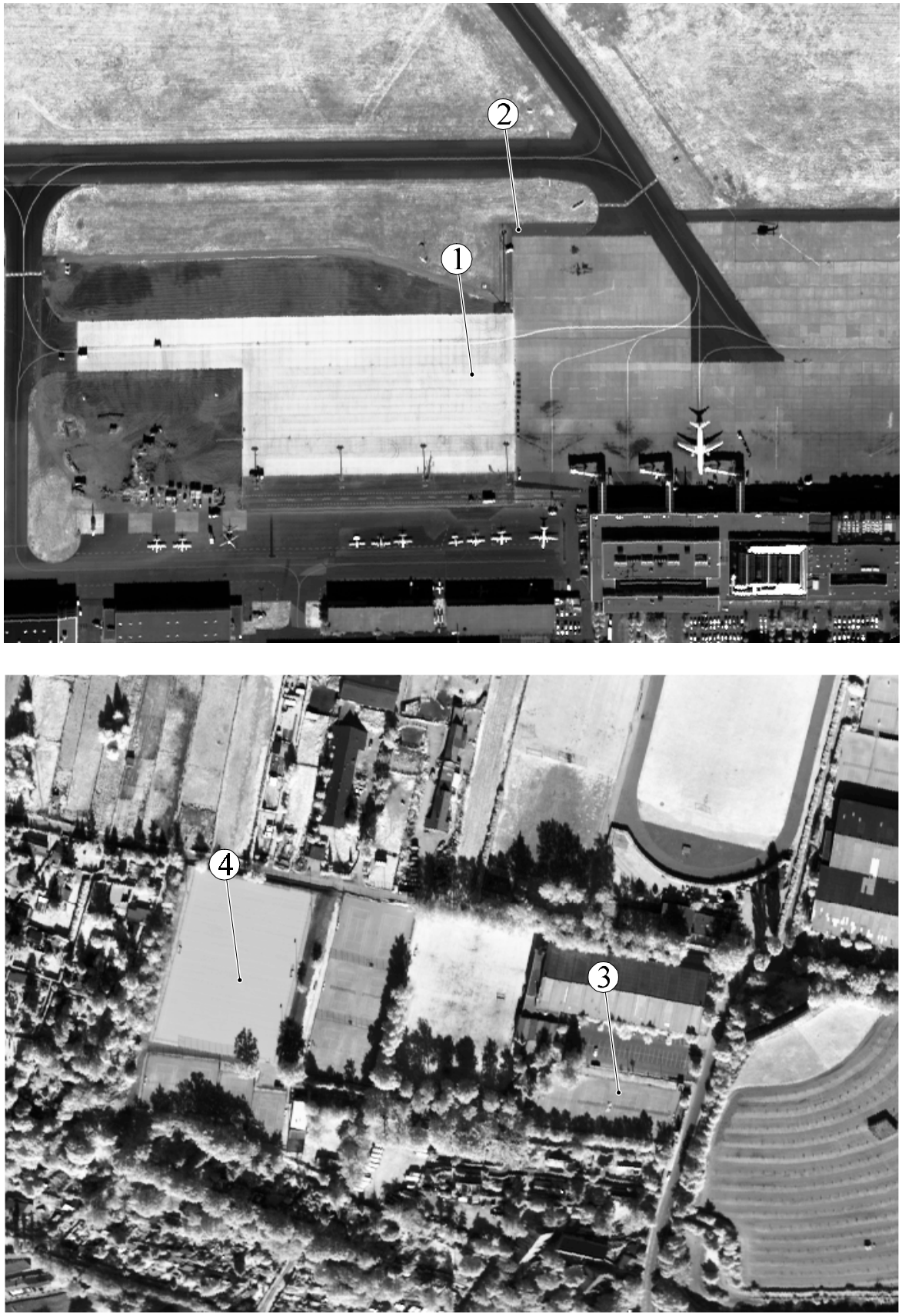


Abb. 5: Positionen der Meßorte 1–4 (Flughafenvorfeld, Asphalt, Tennisplatz, Kunstrasen) auf den Luftbildern von 1994 (300m Flughöhe, Daedalus-Kanal 3, Kontrastverstärkt).

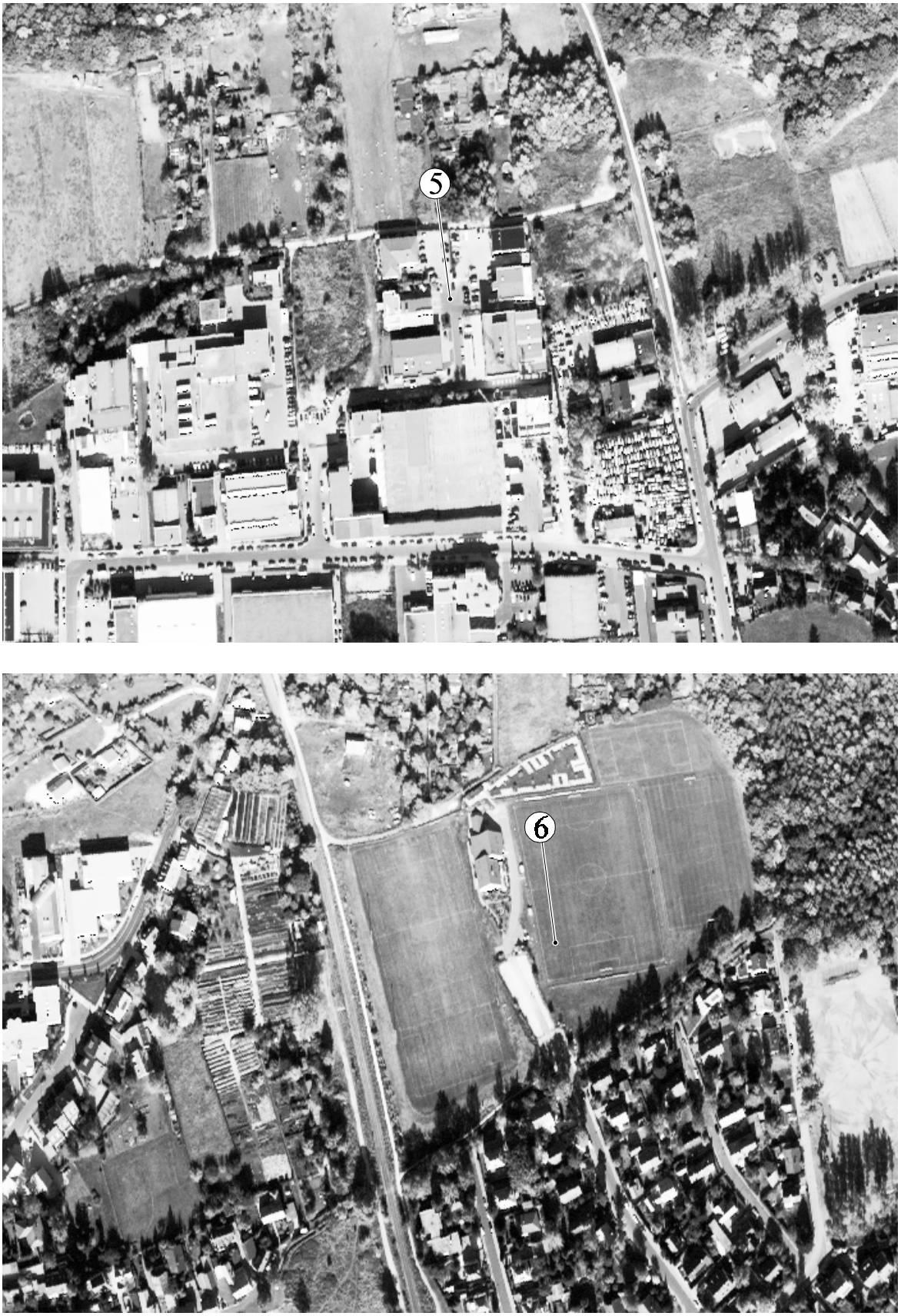


Abb. 6: Wie Abb. 5, jedoch Positionen der Meßorte 5 (Straße) und 6 (Rasen).

Das Gerät war mit drei Personen relativ leicht auch an Orte zu transportieren, die mit dem Pkw nicht zugänglich waren. An jedem Ort wurde zuerst (nach jedem Neuaufbau des Stativs mit Detektorkopf) eine Vergleichsmessung vorgenommen, bei der mit beiden Kanälen (reference/target) des IRIS **dieselbe** Referenzfläche (eine mit einer $BaSO_4$–Lösung „weiß“ gestrichene Fläche) gemessen wurde. So konnte nachträglich die Drift der Differenz zwischen den beiden Kanälen über die gesamte Meßzeit bestimmt werden. Anschließend wurden dann eine oder mehrere Spektren an dieser Stelle aufgenommen, jeweils immer gleichzeitig Referenz- und Zielfläche. Aufgezeichnet wurden die Daten von einem tragbaren Notebook–Computer. Dieser übernahm auch die komplette Steuerung des IRIS während der Messungen (automatische Einstellung der Verstärkungsfaktoren, Umschalten der Gitter etc.), siehe [HAUSKNECHT 1994] UND [WERNER 1990].

Bedient wurde das Gerät von Herrn Dipl.-Geol. P. Hausknecht, einem Mitarbeiter des Instituts für Optoelektronik der DLR (Abb. 7).

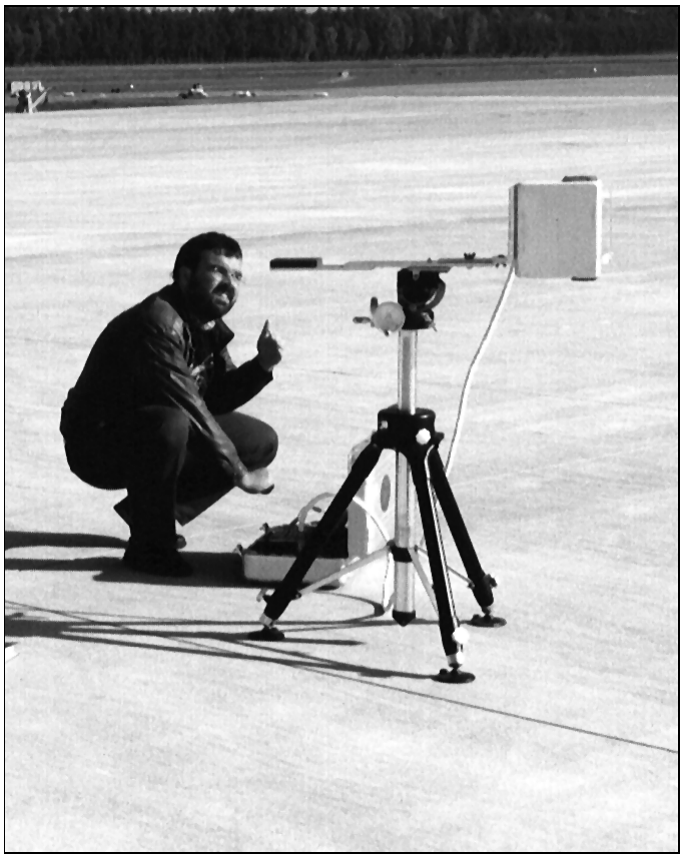


Abb. 7: Meßaufbau des IRIS-Spektrometers (mit Herrn Hausknecht, DLR) auf dem Flughafenvorfeld (Meßort 1)

3.3 Multispektrale Luftbildaufnahmen mit dem Flugzeugscanner

3.3.1 Der Daedalus AADS 1268 – Scanner

Zur Aufnahme der Luftbilder während der Überfliegung wurde ein im Flugzeug (DO-228, DLR) eingebauter 11–Kanal–Multispektralscanner des Typs AADS 1268 von der Fa. Daedalus Enterprises, USA, verwendet [DAEDALUS 1990].

Der Scanner besteht im wesentlichen aus den Komponenten

- Scan-Kopf
- Spektrometer
- Digitalisierer und Verstärker
- Magnetband
- vertikales Gyrometer

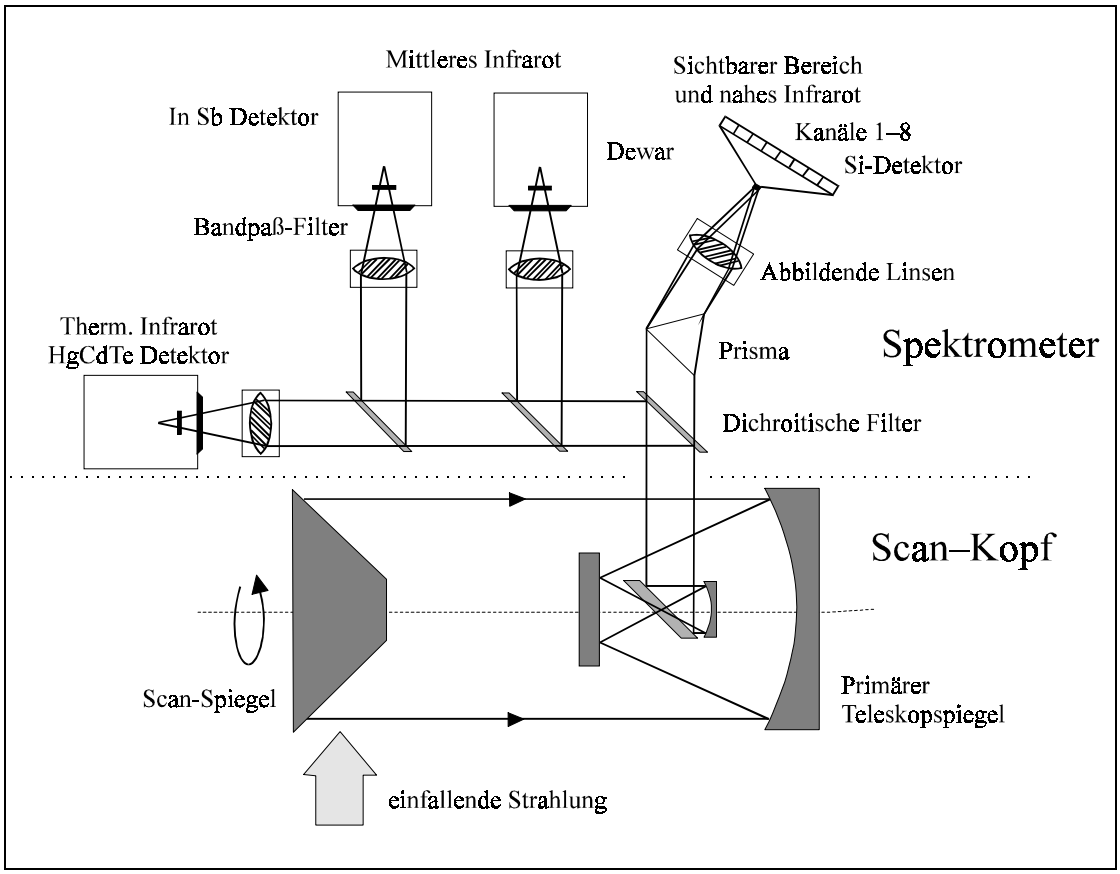


Abb. 8: Scan-Kopf und Spektrometereinheit des Daedalus AADS 1268

Der Scan-Kopf tastet die Meßfläche (hier die Erdoberfläche) mit einem rotierenden Spiegel senkrecht zur Flugrichtung ab. Er erzeugt so bei einem Schwad von ±42,96° ein Bild mit Bildzeilen von 716 Pixeln (= Picture Elements = Bildpunkte) Breite senkrecht zur Flugrichtung.

Der Scanner erreicht bei der niedrigstmöglichen Flughöhe von 300m eine Bodenauflösung (pixelsize) von 75x75 cm^2.

Abb. 8 zeigt eine Prinzipskizze des Daedalus-Scanners. Das Spektrometer teilt zunächst mit Hilfe von dichroitischen Filtern die einfallende Strahlung in vier Spektralbereiche auf. Der erste Bereich, der dem Sichtbaren und nahen Infrarot entspricht, wird mit einem Prisma spektral zerlegt und fällt dann auf acht Si-CCD-Sensoren. Die Strahlung im zweiten und dritten Bereich (mittleres Infrarot) wird mit InSb-Detektoren gemessen und der vierte Bereich (thermisches Infrarot) mit einem HgCdTe-Detektor.

Tabelle 3 zeigt die Spektralbereiche der Daedalus-Kanäle und deren Bandbreite, und in Abb. 10 sind die Apparatefunktionen dargestellt.

Abb. 9 zeigt die IRIS-Messung „Kunstrasen 1994“ über den gesamten Meßbereich (gestrichelt). Die Spektralbereiche des Daedalus-Scanners sind hierbei durch durchgezogene Linien markiert, die auch in Tabelle 3 aufgeführt sind [HEPP 1994].

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

Tabelle 3: Spektralbereiche der Daedalus AADS 1268 – Detektoren

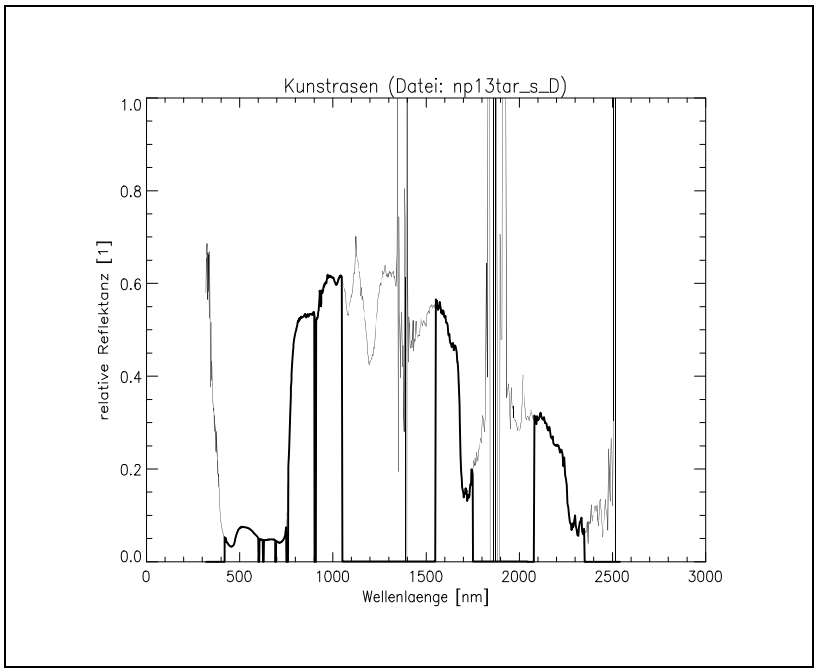


Abb. 9: IRIS-Messung „Kunstrasen“. Fett: Bereiche der Daedalus-Kanäle

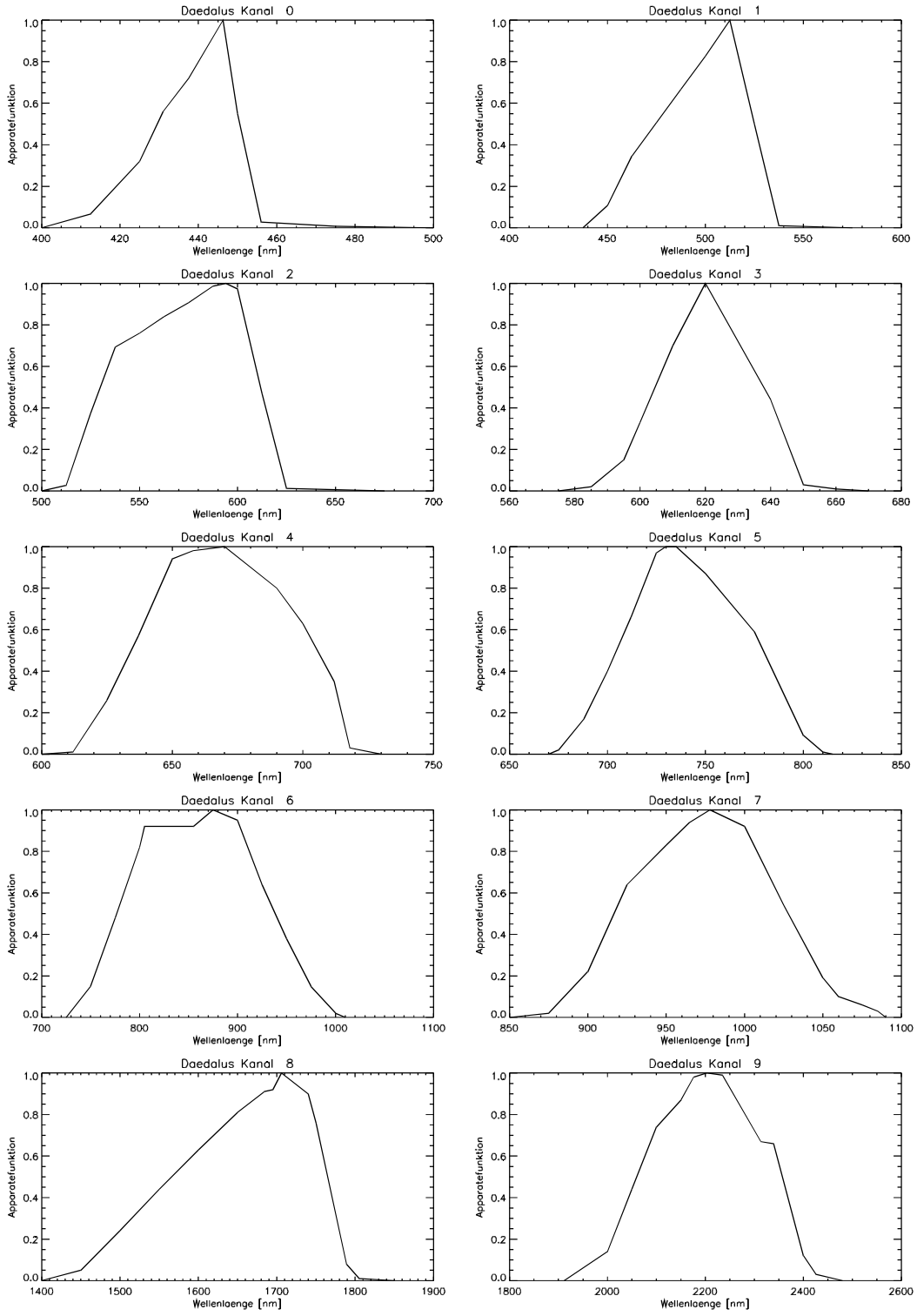


Abb. 10: Apparatefunktionen der Daedalus AADS 1268 – Detektoren

Der thermische Kanal wird mit zwei Schwarzkörperstrahlern (niedrige und hohe Temperatur), die sich im Daedalus-Scanner befinden, während der Messung kalibriert. Dazu wird jeweils ein Strahler am Anfang, bzw. am Ende jeder Scanzeile gemessen. Dieser Meßwert wird ebenfalls aufgezeichnet und in den Header-Daten gespeichert (Abb. 25).

Die geometrische Auflösung des Scanners beträgt 2,5 mrad senkrecht zur Flugrichtung. Das entspricht bei einer Flughöhe von 300m einer Pixelbreite von 75 cm am Boden. Die Auflösung

in Flugrichtung ist hauptsächlich durch die Fluggeschwindigkeit und die Scanrate bestimmt. Sinnvollerweise wählt man diese so, daß sich quadratische Bodenbildelemente ergeben.

Ein unvermeidbares Kippen des Flugzeugs während des Fluges entlang der Flugrichtung (rolling), wird von einem Gyrometer erfaßt und zur Korrektur des Scannerbildes herangezogen. Bis zu 15° Abweichung vom Horizontalflug wird so automatisch kompensiert.

3.3.2 Durchführung der Überfliegung

Die Überfliegung des Nürnberger Flughafens und Umgebung am 18.10.1994 erfolgte in einem Flugzeug des Typs DO-228. Dabei wurden mit dem Daedalus AADS 1268 insgesamt 10 Flugstreifen aus 300m Höhe (T1-T10) und 3 Flugstreifen aus 1800m (S2, S4, S6) Höhe aufgenommen (Abb. 11).

Abb. 11: Flugrouten der Überfliegung am 18.10.1994 (T=300m, S=1800m)

Abb. 12 zeigt beispielhaft das Aussehen und die Qualität eines Scannerbildes. Zu sehen ist das Grauwertbild des Spektralkanals 3 (0,52 – 0,60µm) eines Ausschnitts aus einem Flugstreifen in 300m Flughöhe.

Abb. 12: Auszug aus einem Flugstreifen in 300m Flughöhe (Spektralkanal 3), mit Gewerbegebiet, Kleingärten und Landschaftsschutzgebiet (oben = Osten)

3.3.3 Farbinfrarot-Aufnahmen

Es sind von drei Flugstreifen in 300m Höhe (T8 bis T10) im Maßstab 1:2000 und von allen Flugstreifen in 1800m Höhe im Maßstab 1:12000 zusätzlich zu den Scanneraufnahmen noch insgesamt 92 Farbinfrarotbilder gemacht worden. Verwendet wurde eine Kamera vom Typ RMK A 15/23 mit einem Vorsatzfilter „Zeiss D“, der praktisch für alle Wellenlängen kleiner 530 nm undurchlässig ist (Abb. 13).

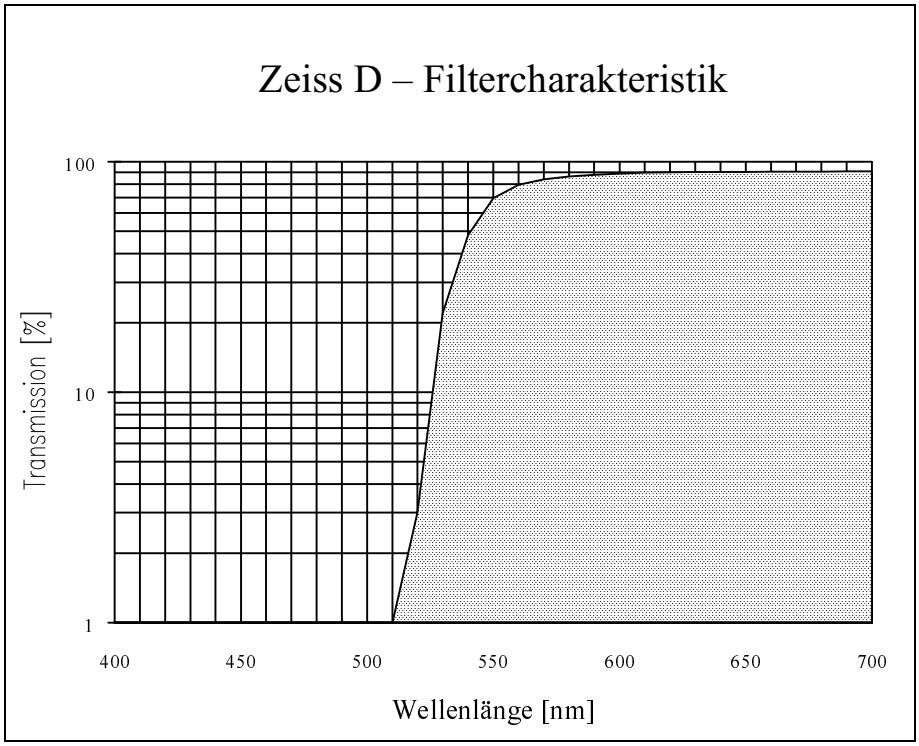


Abb. 13: Zeiss D - Filtercharakteristik

Als Film kam der infrarot-empfindliche „KODAK AEROCHROME Infrared Film 2443“ zum Einsatz. Eine der drei farbgebenden Schichten dieses Filmes weist eine Empfindlichkeit für den Wellenlängenbereich im nahen Infrarot (700–900nm) auf (Tabelle 4 und Abb. 14). Das Spektrum von Vegetation weist einen steilen Anstieg im Infrarot auf, der bei künstlichen Flächen nicht zu beobachten ist. Es können so auf den Aufnahmen mit diesem Film leicht Vegetationsflächen gefunden werden, da diese ausschließlich für die Färbung der Cyanschicht verantwortlich sind. Der Film KODAK 2443 ist ein Umkehrfilm, dessen Farbschichten bei ihrer „Einfärbung“ dunkler werden. Vegetation wird deshalb auf dem Film nicht in der Farbe Cyan, sondern in den Farben Gelb und Magenta, also rötlich erscheinen.

Farbe der Filmschicht	„aufgenommene“ Farbe
Gelb	Grün
Magenta	Rot
Cyan	Infrarot

Tabelle 4: Farbempfindlichkeit des Farbinfrarotfilms KODAK 2443

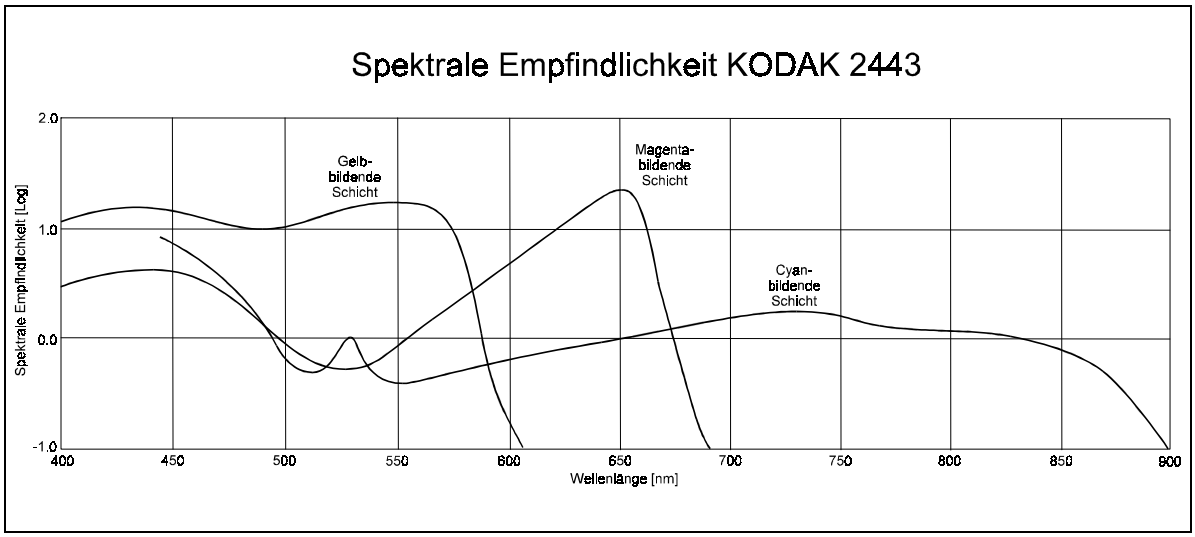


Abb. 14: Spektrale Empfindlichkeit des Farbinfrarotfilms KODAK 2443

Die Auflösung des Films beträgt 32 Linien pro Millimeter. Aufnahmen aus 300m Höhe (Maßstab 1:2000) haben also eine Boden-Auflösung D_{300} von

$$D_{300} = \frac{2000}{32\frac{Linien}{mm}\cdot 10\frac{mm}{cm}} = 6{,}25\frac{cm}{Linie}.$$

Für Bilder aus 1800m Höhe (Maßstab 1:12000) ergibt sich auf gleiche Weise eine Boden-Auflösung von

$$D_{1800} = 37{,}5\frac{cm}{Linie}.$$

4 Auswertung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Aufbereitung der Meßwerte aus den IRIS- und Daedalus-Messungen. Es wird dargestellt, welche Methoden und Rechenschritte angewendet werden müssen, um absolute Reflektanzspektren zu erhalten.

4.1 IRIS - Reflektanzspektren

Das Flußdiagramm (Abb. 15) zeigt die bei der DLR übliche und auch hier angewandte Vorgehensweise zur Erzeugung von absoluten Reflektanzspektren aus den Messungen des IRIS-Spektroradiometers.

Die Berechnungen bis zum Erhalt der relativen Reflektanzspektren wurde von der IRIS-Auswertesoftware bei der DLR prozessiert.

Diese relativen Reflektanzspektren wurden von der DLR als ASCII – Dateien an die Universität Hamburg geliefert. Die Dateien (Dateinamensendung „_s“) bestanden pro Messung aus jeweils 2 Spalten und 862 Zeilen und enthielten in der ersten Spalte den spektralen Meßkanal (in nm) und in der zweiten Spalte die relative Reflektanz (Tabelle 5, Seite 29).

Die einzelnen Arbeitsschritte werden im folgenden erläutert.

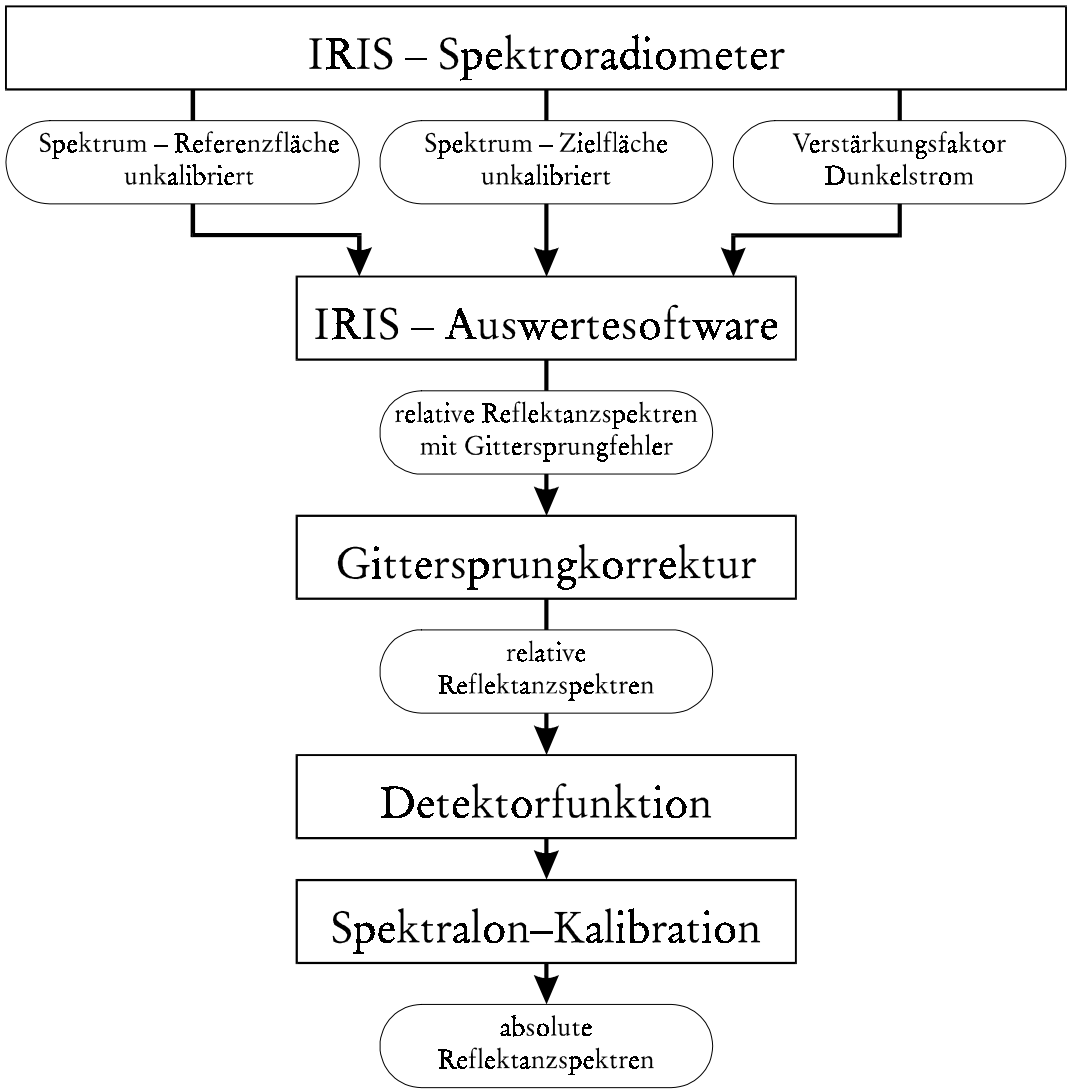


Abb. 15: Flußdiagramm zur Erzeugung von absoluten Reflektanzspektren aus den IRIS-Messungen

4.1.1 Erzeugung von Reflektanzspektren

Da für die Einzelmessungen keine Eichung auf absolute spektrale Strahldichten vorgenommen wurde, lassen sich aus den isolierten Ziel- und Referenzflächenmessungen keine direkten Aussagen ziehen. Die gemessenen Spektren müssen, um physikalisch sinnvolle Größen darzustellen, noch aufbereitet und miteinander in Bezug gesetzt werden. Hierzu dient ein Programm, das von den Herstellern des IRIS an die DLR mitgeliefert wurde. Das Programm übernimmt folgende Arbeitsschritte:

- Subtraktion des Dunkelstroms (Abb. 16),
- Division durch den Verstärkungsfaktor, der während der Messung vom IRIS automatisch und dynamisch ausgewählt und aufgezeichnet wurde,
- Berechnung des Quotienten aus Ziel- und Referenzmessung (relative Reflektanz).

Die Formel zur Berechnung der relativen Reflektanz lautet demnach:

$$R_{rel} = \frac{(S_Z - D_Z) \cdot V_R}{(S_R - D_R) \cdot V_Z} \qquad \text{(Gleichung 4.1)}$$

Mit S = Spektrum, D = Dunkelstrom und V = Verstärkungsfaktor für Ziel- (Z) und Referenzmessung (R).

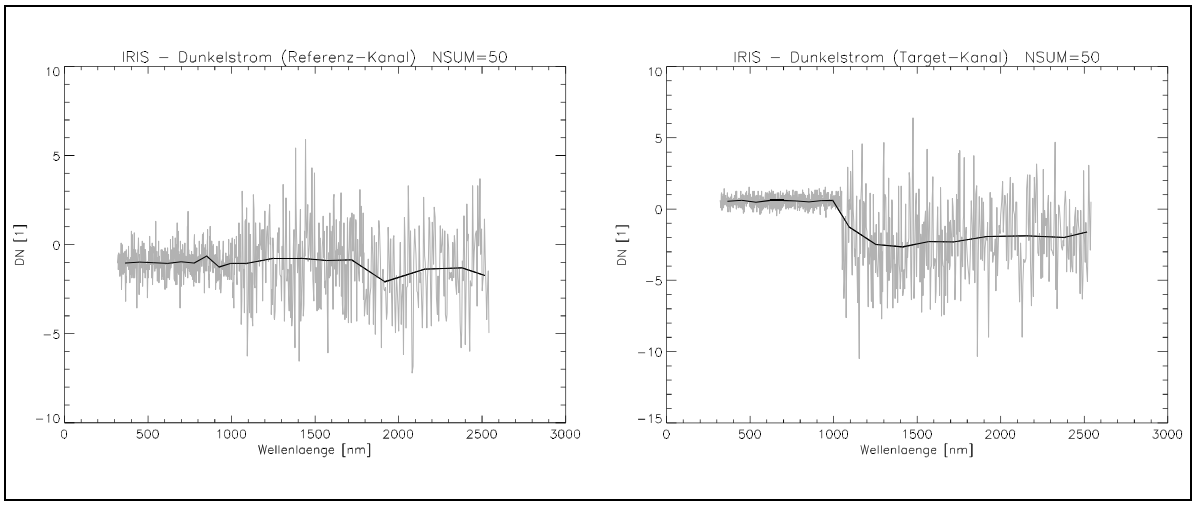


Abb. 16: Dunkelströme der beiden Meßkanäle (Rohmeßwert und mit 50-Punkt-Mittelwertbildung)

4.1.2 Gittersprungkorrektur

Da das IRIS-Spektrometer mit 3 verschiedenen Gittern arbeitet, ergeben sich bei den Übergängen von einem Gitter zum nächsten Effekte, die zunächst einen Anschluß der sich ergebenden Spektren verhindert und systematische Fehler erzeugt, die sich in Unstetigkeiten im Gesamtspektrum ausdrücken. Empirische Vergleichsmessungen der DLR mit anderen Spektrometern haben ergeben, daß sich folgende Vorgehensweise zur Korrektur der Gitterdifferenzen (Gittersprungkorrektur) als zuverlässig herausgestellt hat:

Es wird davon ausgegangen, daß die Messungen mit dem ersten Gitter (Spektralbereich 319–1047 nm) repräsentativ ist, da die Aufnahme mit Si-Detektoren erfolgt, die i.a. eine hohe Genauigkeit aufweisen. Da sich die Messung mit dem zweiten Gitter aufgrund physikalischer Plausibilität stetig an die Messung mit dem ersten Gitter anschließen muß, werden die Meßwerte des zweiten Meßbereiches durch Addition (oder Subtraktion) einer Konstanten korrigiert, so daß die Unstetigkeit verschwindet. Ebenso wird dann mit dem dritten Meßbereich in Bezug zum zweiten verfahren.

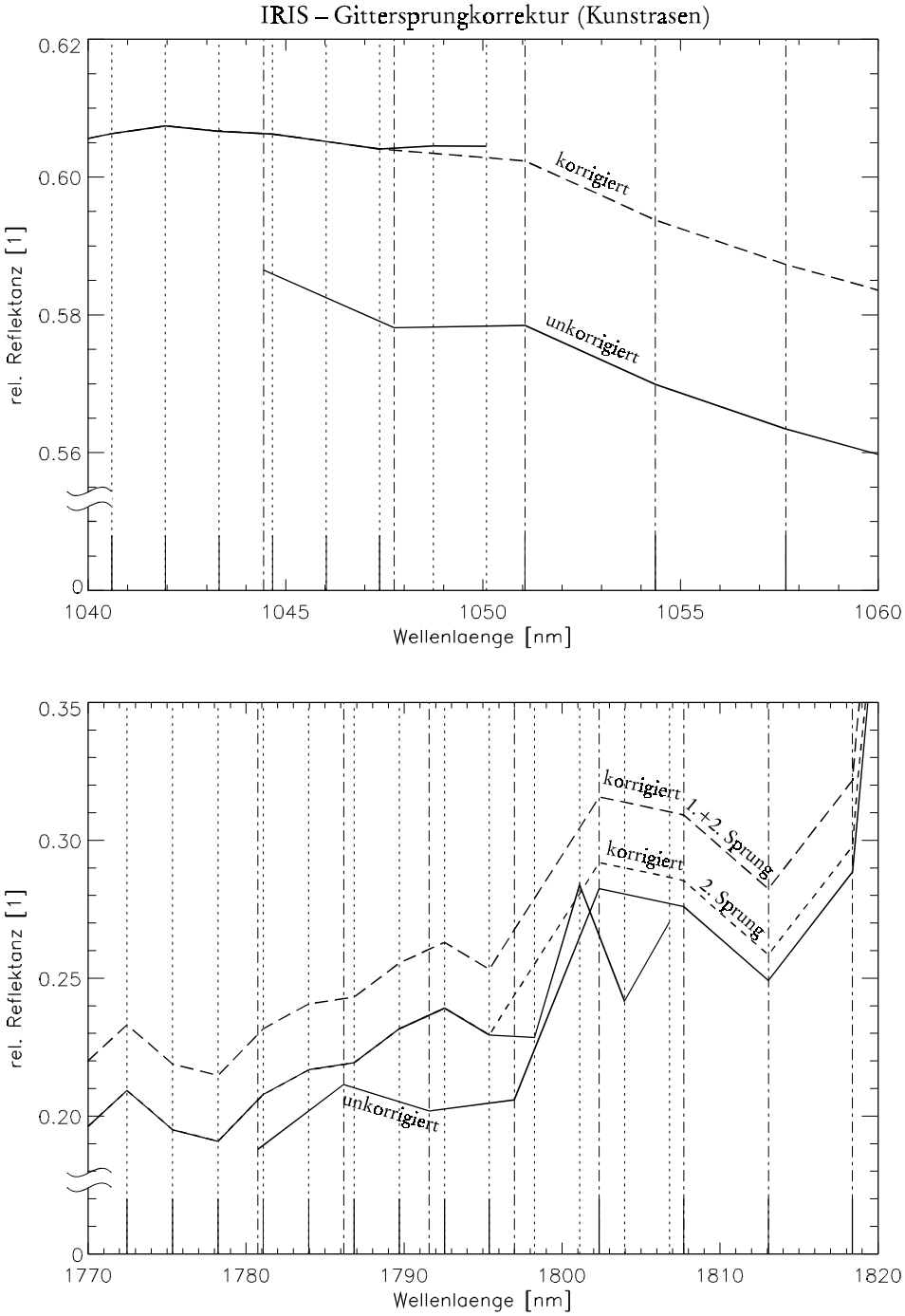


Abb. 17: Gittersprungkorrektur am Beispiel der Kunstrasenmessung

Abb. 17 zeigt einen solchen Vorgang der Gittersprungkorrektur graphisch. Die obere Graphik zeigt die Unstetigkeit, die sich beim Übergang vom ersten zum zweiten Gitter ergibt (durchgezogene Linie). Der Sprung wird durch die IRIS-Auswertesoftware so korrigiert, daß das Spektrum die Form der gestrichelten Linie annimmt.

Beim zweiten Gittersprung wird ebenso verfahren, so daß nach der Korrektur das Spektrum der kurz gestrichelten Linie entsteht. Wird nun noch die Verschiebung des Spektrums durch die erste Gittersprungkorrektur berücksichtigt, ergibt sich das endgültige, lang gestrichelte Spektrum. Die Gittersprungkorrektur verschiebt die Spektren um ca. 2%.

4.1.3 Detektorfunktion

Die Charakteristika der beiden Meßkanäle des IRIS (reference/target) sind i.a. nicht gleich, also müssen die Messungen von Referenz- und Zielfläche noch mit der Korrekturfunktion (Detektorfunktion) für dieses Gerät korrigiert werden. Hierzu kann eine Messung herangezogen werden, bei der mit beiden Meßkanälen dieselbe Referenzfläche gemessen wird, in diesem Fall eine Spektralon–Spektralon–Labormessung (Abb. 19). Bestimmt wird diese Korrekturfunktion nun durch Bildung des Quotienten aus den Spektren des Ziel- und Referenzkanals. Genaugenommen handelt es sich also um einen Korrekturfaktor für jede Stützstelle des gemessenen Spektrums, gewissermaßen ein „Detektor–Korrektur–Spektrum“:

$$R_k(\lambda) = R_{rel}(\lambda) \cdot \frac{S_{Z,Sp}(\lambda)}{S_{R,Sp}(\lambda)} \qquad \text{(Gleichung 4.2)}$$

Die mit dieser Detektorfunktion korrigierten (multiplizierten) Dateien erhielten zusätzlich zum Dateinamen noch die Endung „_D“ (z.B. „np13tar_s_D“). Einen Auszug aus einer solchen Datei zeigt Tabelle 5. Abb. 18 zeigt das Spektrum der gesamten Messung „np13tar_s_D“ graphisch.

Wellenlänge	rel. Reflektanz
319.420	0.579805
321.220	0.654342
323.010	0.660922
324.800	0.685582
.	.
.	.
.	.
2478.79	0.242834
2483.20	0.194508
2487.62	0.130442
2492.04	0.267006

Tabelle 5: Auszug aus der Datei „np13tar_s_D“

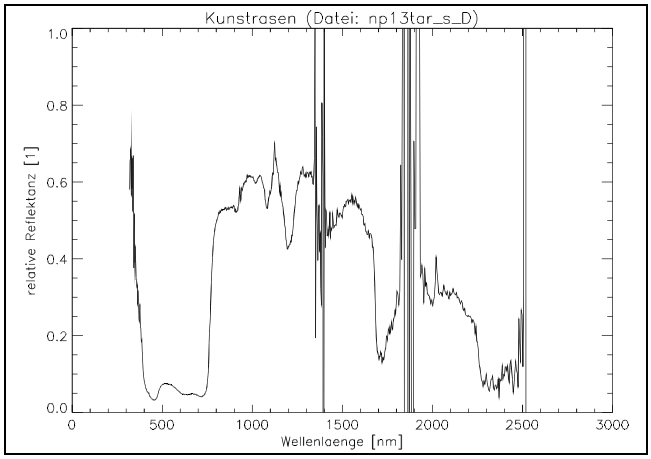


Abb. 18: relative Reflektanz der Messung „Kunstrasen“ (Datei „np13tar_s_D“)

Von der DLR wurden zwar neben den unkorrigierten Daten auch Dateien mit einer Detektorfunktionskorrektur geliefert (Dateinamensendung „_R“), nur wurde hierbei die Detektorfunktion bestimmt aus den ersten beiden $BaSO_4$–$BaSO_4$–Messungen auf dem Flughafenvorfeld, die ein sehr großes Rauschen zeigen und große Ungenauigkeiten an den Stellen zeigen, an denen die Atmosphäre viel von der Sonnenstrahlung absorbiert (sehr kleine Strahldichten). Hinzu kommt, daß die $BaSO_4$–Referenzfläche eine kleinere Reflektanz besitzt, so daß bei der Messung an Spektralon im Labor mit einer künstlichen Lichtquelle größere Intensitäten (kleineres relatives Rauschen) gemessen werden können. Deshalb wurde in dieser Arbeit mit der Detektorfunktion der Labormessung gearbeitet.

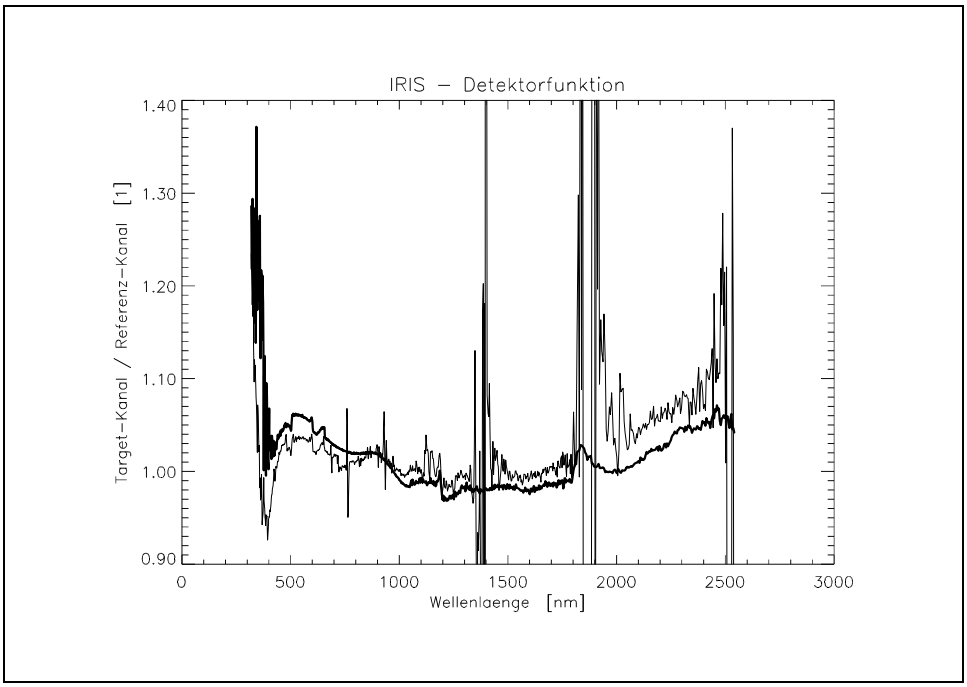


Abb. 19: Detektorfunktion des IRIS-Spektrometers, fett, und Original-Detektorfunktion DLR, dünn (siehe Text).

4.1.4 Kalibrierung mit Spektralon-Normal

Um nun auf Werte für die absoluten Reflektanzen zu kommen, mußte die Referenzfläche $BaSO_4$ noch mit Hilfe einer Spektralon-Referenzfläche kalibriert werden, von der die absolute Reflektanz R_{Sp} bekannt ist (Herstellerangaben, Abb. 21). Hierzu stand eine Labormessung S_{BaSp} der DLR zur Verfügung, bei der die relative Reflektanz der Spektralon-Referenzfläche in Bezug auf die $BaSO_4$-Referenzfläche gemessen wurden (Abb. 20). Spektralon–Reflektanz–Materialien sind sehr harte, maschinell hergestellte Thermoplastiken, die bis zu 350°C thermisch stabil und extrem hydrophob sind. Verunreinigungen der Oberfläche lassen sich mit Sand unter fließendem Wasser abwaschen.

Die absolute Reflektanz R_{abs} läßt sich so berechnen aus der relativen Reflektanz R_k (siehe Gleichung 4.2):

$$R_{abs} = R_k \cdot S_{BaSp} \cdot R_{Sp} \qquad \text{(Gleichung 4.3)}$$

Der Hersteller (Fa. Labsphere, USA) der Spektralon-Referenzfläche gibt für die absoluten Reflektanzen eine Genauigkeit von 5% in den Spektralbereichen von 250–360 nm und 740–2500 nm und 0.5% im Bereich 360-740 nm (sichtbar) an.

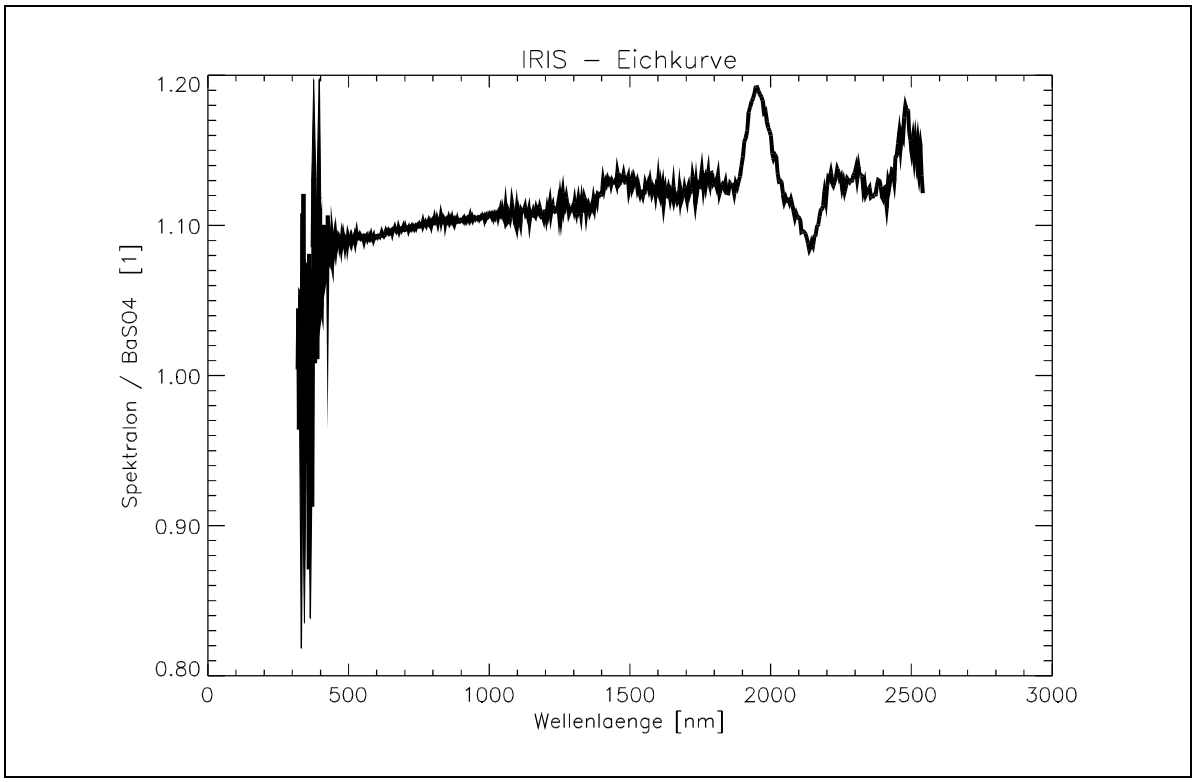


Abb. 20: Messung zur Eichung der $BaSO_4$-Referenzfläche mit Hilfe der Spektralon-Referenzfläche (Quelle: DLR)

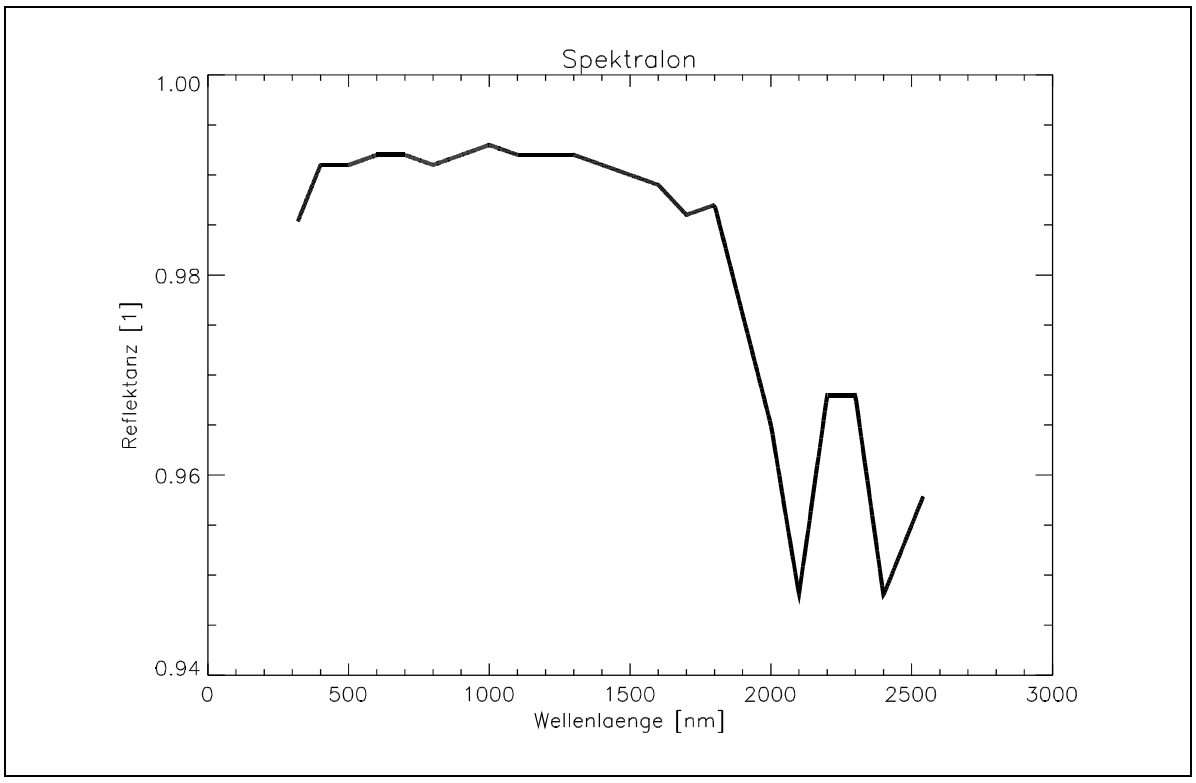


Abb. 21: Absolute Reflektanz der Spektralon-Referenzfläche (Quelle: Labsphere)

Nach der Kalibrierung mit der Spektralon-Fläche stehen dann absolute Reflektanzspektren zur Verfügung, die dann zum Vergleich mit den Reflektanzberechnungen aus den Daedalus-Scannerdaten herangezogen werden können.

4.1.5 Fehlerabschätzung

Eine systematische Fehlerbetrachtung der absoluten Reflektanzen ist, ebenso wie die Berechnung der Fehlerfortpflanzung, wegen der Unkenntnis der Einzelfehler einiger Größen, die in die Berechnungen eingehen, nicht möglich.

Von den Betreibern des IRIS-Spektrometers (DLR) wurden einige Angaben über den Fehler und die Genauigkeit der während der Messung verwendeten Geräte und Materialien gemacht:

Das IRIS-Spektrometer

- Genauigkeit eines Kanals: 2,5% (1,5% Rauschen, 1% Optik, Mechanik etc.)
- Langzeitkonstanz: 0,5% pro Monat

Die $BaSO_4$ – Referenzfläche

- Langzeitkonstanz: einige % pro Jahr (hygroskopischer Effekt)

Die Spektralon – Referenzfläche

- Genauigkeit der absoluten Reflektanzen: 5% (250–360 nm und 740–2500 nm)
  0,5% (360-740 nm)

Durch Anwendung der Gittersprungkorrektur tritt ein Fehler von ca. 1% auf.

Für die relativen Reflektanzen ergibt sich dann ein Fehler von ca. 6%. Diesen Wert berechnet sich aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz. Hierbei entsteht bei der Division der beiden Meßkanäle ein Fehler von 3,5%. Dieser tritt auch bei der Bestimmung der Detektorfunktion auf, so daß sich nach Korrektur mit dieser der Fehler auf 5% erhöht. Bei der Berechnung der absoluten Reflektanzen (durch Multiplikation mit dem Kalibrationsspektrum $BaSO_4$-Spetralon und dem Spektralon-Reflektanzspektrum) ergibt sich dann ein Fehler von ca. 6,1% im sichtbaren (360-740 nm) und 7,9% im Infrarotbereich (740–2500 nm).

Eine alternative Fehlerabschätzung ergibt sich auch aus 5 Messungen, die in kurzen Zeitabständen (2 Minuten) an einem Ort (Asphalt, Flughafen) durchgeführt wurden, ohne das Spektrometer zu verschieben. Die statistische Auswertung dieser Messungen ergibt einen Fehler für die relativen Reflektanzen von maximal 1% im sichtbaren Spektralbereich und bis zu 10% im Infrarotbereich.

Offensichtlich ist der Fehler der IRIS-Messungen stark wellenlängenabhängig, so daß die Fehlerangabe der DLR von 2,5% pro Kanal zu pauschal erscheint. Es ist anzunehmen, daß der Fehler der Messungen im sichtbaren Bereich deutlich unter den oben berechneten 6,1% und im Infrarotbereich über 7,9% liegt.

Zur stichprobenartigen Überprüfung der spektralen Eichung und des Auflösungsvermögens des IRIS wurde von der DLR eine Messung mit dem IRIS an einem He-Ne-Laser durchgeführt, der elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge von 632.5 nm emittiert (Abb. 23). Die Messung ergab eine Reproduzierbarkeit der Messung von $\Delta\lambda = \pm 0{,}5\text{nm}$.

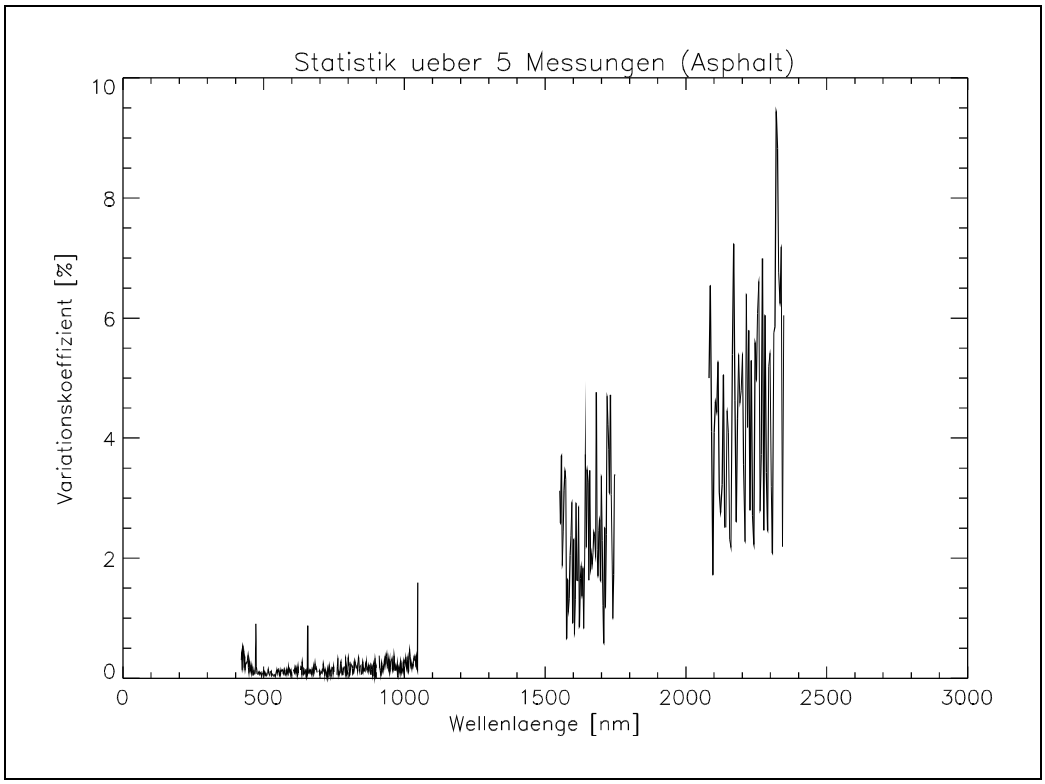


Abb. 22: Spektraler Variationskoeffizient des IRIS-Spektrometers, bestimmt aus 5 Messungen auf dem Flugafengelände (Asphalt)

Als Maß für die Auflösung des Spektrometers kann die Halbwertsbreite der Lasermessung herangezogen werden [KOLLEWE 1993]. Die Halbwertsbreite, also die Breite des Peaks bei der Hälfte des Maximums, beträgt in diesem Fall etwa $W_{HM} = 4{,}3\text{nm}$.

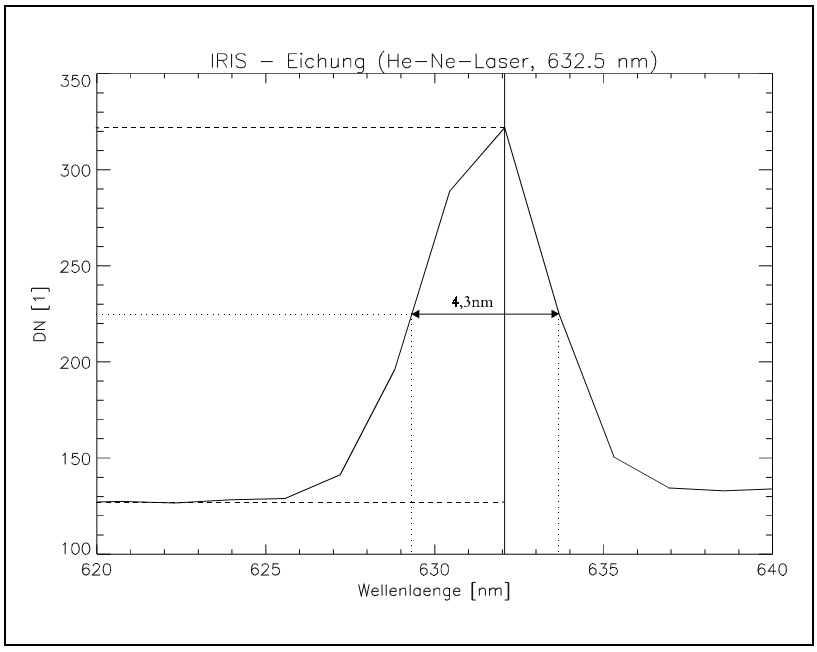


Abb. 23: Messung an einem He-Ne-Laser

4.2 Erzeugung von Reflektanzbildern aus den Daedalus–Luftbildaufnahmen

Die Erzeugung von Reflektanzbildern aus den Messungen des Daedalus AADS 1268 ohne Zuhilfenahme von Bodenmessungen zur Reflektanzkalibrierung läßt sich in mehrere Arbeitsschritte aufteilen. Abb. 24 zeigt das Flußdiagramm.

Zuerst werden die Rohdaten des Daedalus mit Hilfe eines Konvertierungsprogrammes (`daedalus2tiff`) in ein leicht zu verarbeitendes Bilddatenformat umgewandelt. Unter Anwendung von Eichdaten werden dann Strahldichtebilder erzeugt (`ref_image`). Mit den Methoden eines Strahlungstransportmodells und einer Detektorsimulation werden parallel zu diesem Prozeß Strahldichten berechnet, die der Sensor messen sollte, wenn er die reflektierte Strahlung eines Objektes mit einer bestimmten Reflektanz aufnimmt (`sensat-5`). Dieses wird für diskrete Stützstellen der Parameter „Scanwinkel“ und „Reflektanz des Objektes“, sowie für alle Daedalus-Kanäle durchgeführt, so daß eine dreidimensionale Tabelle (`atm-Datei`) entsteht, deren Eintragungen aus (theoretischen) Strahldichten bestehen. Mit dieser Tabelle kann nun mit Hilfe des „Look-up“-Verfahrens und einer linearen Interpolation zwischen den Stützstellen jeder gemessenen Strahldichte ein Reflektanzwert zugeordnet werden (`ref_image`). Für jedes Bildelement der Daedalus-Strahldichtebilder durchgeführt, ergeben sich so Reflektanzbilder. Zum Abschluß werden die Bilder, ebenfalls mit einem theoretischen Modell, um den Überstrahlungseffekt korrigiert [RICHTER 1994, HEPP 1994] (`adjacen`). Das Ergebnis sind Reflektanzbilder im TIFF-Format (siehe 4.2.2).

Diese Vorgehensweise ist der Arbeit von [RICHTER 1994] und [HEPP 1994] entnommen, dessen einzelnen Arbeitsschritte (Kästen im Diagramm Abb. 24) im folgenden erläutert werden.

Die Rohdaten der 13 Flugstreifen (siehe 3.3.2) sind auf 21 Dateien mit einer durchschnittlichen Größe von 25 Megabyte verteilt worden, so daß die Gesamtdatenmenge ca. 525 Megabyte beträgt. Die Gesamtstrecke der Flugstreifen beläuft sich auf ca. 45km.

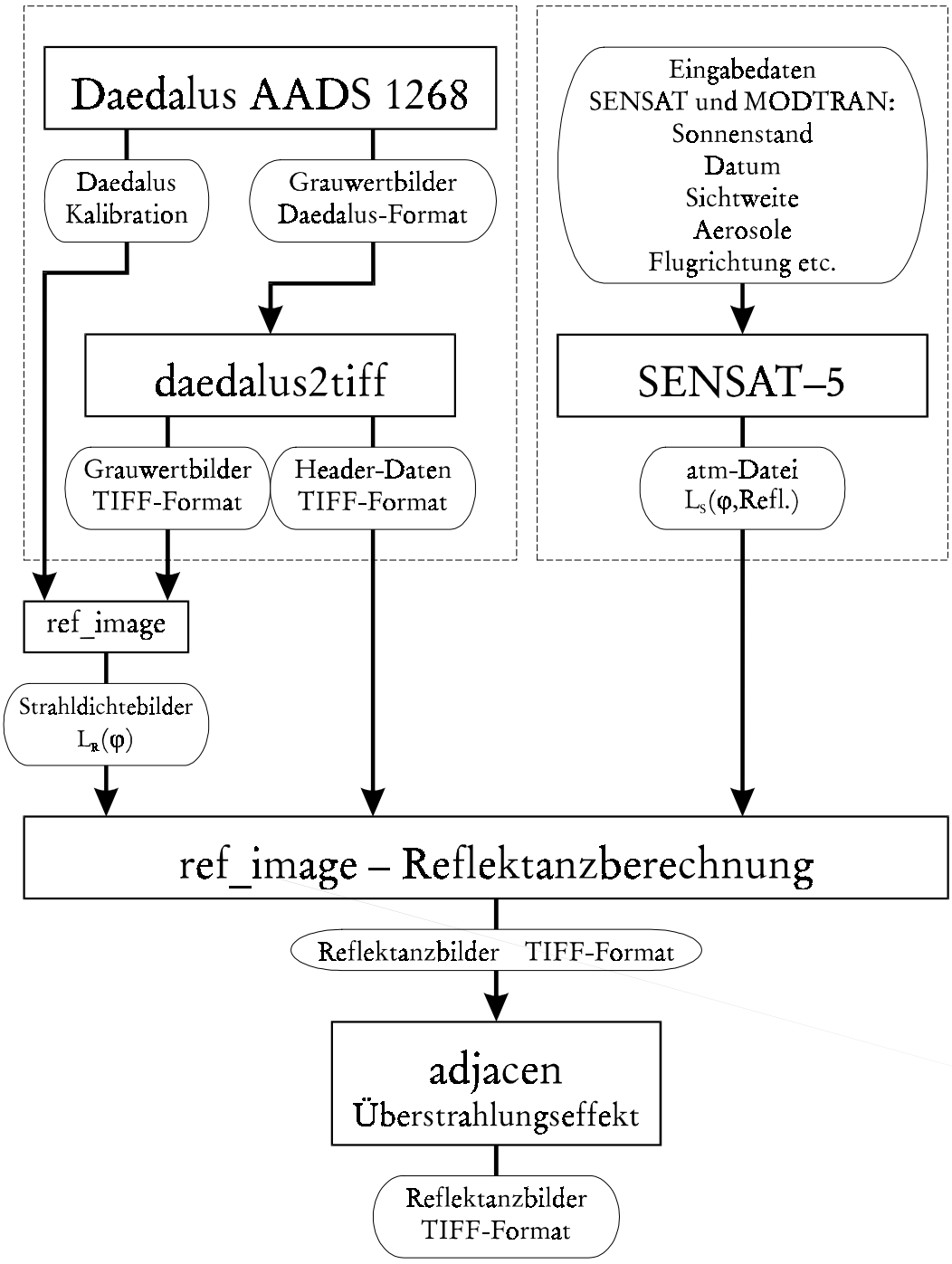
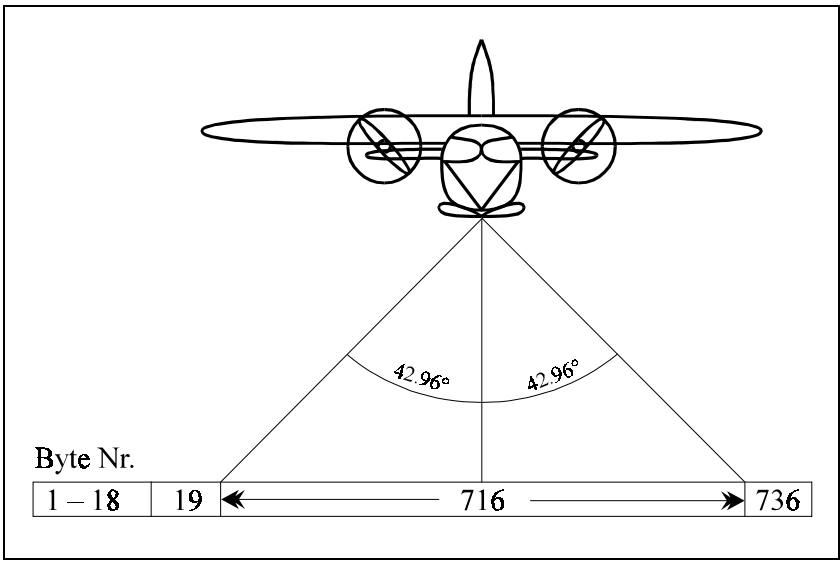


Abb. 24: Flußdiagramm zur Erzeugung von Reflektanzbildern aus den Daedalus-Scannerbildern

4.2.1 Datenformat – Daedalus AADS 1268

Die Scanner–Bilder des Daedalus von der Überfliegung am 18.10.1994 wurden von der DLR auf zwei CCTs (Compter-compatible-tapes) in einem Daedalus-eigenen Format in Form von 22 Dateien geliefert. Abb. 25 zeigt, in welchem Format die Daten auf das Band aufgezeichnet werden.



Byte

1–4..... Scanzeilenzähler
5–8..... Eingabedaten
9–12..... Temperaturen Thermalreferenz 1,2
13–17... Externe Digitaldaten
18..... Statusinformation
19..... Meßwert Thermalreferenz 1
20–735 . Bilddaten
736..... Meßwert Thermalreferenz 2

Abb. 25: Aufzeichnungsformat der Daten des Daedalus AADS 1268 für jeden Kanal

Die Kalibrierung auf absolute Strahldichten erfolgte mit einer Daedalus-„Testbench“ und wurde 15 Tage nach der Überfliegung von der DLR durchgeführt.

4.2.2 Datenkonvertierung – daedalus2tiff

Zur Weiterverarbeitung wurden die Daten mit dem C-Programm „daedalus2tiff“ in das TIFF-Format (tagged image file format, siehe [POHL]) umgewandelt, und zwar jeweils eine Tiff-Datei für die Bilddaten (Bytes 20–735, Abb. 25) und eine für die Headerdaten (Dateinamenserweiterung „-dat“), die diverse Informationen, wie Verstärkungsfaktor, Dunkelstrom etc. beinhalten (Bytes 1-19 und 736, Abb. 25). Jede Tiff-Datei enthält für jeden Daedaluskanal einen Bildeintrag, so daß sämtliche 10 Bildinformationen eines Flugstreifens in einer Datei zusammen verarbeitet werden können.

4.2.3 Strahlungstransportsimulation – SENSAT–5

Um aus den Meßdaten eines bildgebenden Scanners Reflektanzen zu berechnen, ist es vorerst nötig, die physikalischen Vorgänge des Strahlungstransportes von der Sonne über den Reflektor zum Sensor zu simulieren um so die Strahldichte L_S (L_S = simulierte Strahldichte) siehe Abb. 24) zu berechnen. Dieses wird für jeden Kanal getrennt durchgeführt. Die Berechnungen der Strahlungstransportsimulation übernimmt das Programm LOWTRAN-7 [RICHTER 1994]. Hierbei wird für alle Oberflächen angenommen, daß sie dem Modell des Lambert-Reflektors (isotrope Reflexion) genügen. Unter Zuhilfenahme der Ergebnisse von LOWTRAN-7 berechnet dann SENSAT–5 („**Sens**or–**A**tmosphäre–**T**arget“) schließlich für vorgegebene Reflexionsgrade eines Targets die Strahldichte am Sensor [RICHTER 1994]. Hieraus kann man dann aus den gemessenen Strahldichten am Sensor „rückwärts“ („inverse modelling“) die Reflexionsgrade (Reflektanzen) des Targets berechnen („Look-up“ und lineare Interpolation). SENSAT–5 wurde Mitte 1994 fertiggestellt und enthält eine Benutzeroberfläche (Eingabemasken etc.), die unter IDL lauffähig ist (vgl. [RICHTER 1994]).

Als Eingabe benötigt SENSAT (LOWTRAN) Parameter der Messung (Tabelle 6) wie

- den Sonnenstand (berechnet aus Datum und Uhrzeit mit dem Programm „sunposition“ von Rafael Wiemker, Univ. Hamburg, II. Inst. f. Exp.-Physik, Gruppe CENSIS),

- den Tag im Jahr, zur Bestimmung des Abstandes Sonne–Erde,
- die Sichtweite und den Aerosoltyp (städtisch, ländlich),
- die Flugrichtung und -höhe,
- eine Datei, die die Meßdaten eines Radiosondenaufstiegs enthält (steht diese, wie in diesem Fall, nicht zur Verfügung, so muß eine Datei erzeugt werden, die die Daten eines Standard-Atmosphären-Modells enthält; bei dieser Messung wurde die „midlatitude summer atmosphere“ gewählt [MCCLATCHEY 1972], siehe Anhang–SENSAT–5),
- den spektralen Bereich des Detektors,
- die Apparatefunktion des Detektors (aller Kanäle, siehe Abb. 10, Seite 19)

und einige andere zur Festlegung der spektralen Auflösung (Stützstellenabstand).

	1991	1992	1994
Datum Uhrzeit	21.08. 13.50h	25.04. 12.20h	18.10. 11.30h
Sonnen-Zenith-Winkel	41,7°	36°	59,5°
Sonnen-Azimut-Winkel	214,7°	182,7°	171,2°
Tag des Jahres	233	117	291
Sichtweite	25 km	25 km	30 km
Aerosoltyp	städtisch		
Flugrichtung	100° (Ost-Süd-Ost)		
Flughöhe	300m		

Tabelle 6: SENSAT-5 – Eingabedaten

SENSAT–5 erzeugt als Ausgabe eine Tabelle (vgl. Tabelle 7), die die Strahldichte am Detektor in Abhängigkeit der Reflektanz des Objektes für verschiedene Scanwinkel enthält (Datei-Endung „.atm“). Aus dieser läßt sich umgekehrt entnehmen, welchen Wert die Reflektanz eines Objektes haben muß, wenn der Scanner eine gemessene Strahldichte bei einem bekannten Scanwinkel liefert („Look-up-table“-Verfahren zur Invertierung von komplexen Modellen). Außerdem befindet sich in der Tabelle eine Spalte mit Q-Faktoren, die zur Berechnung des Überstrahlungseffektes herangezogen werden, sowie eine Spalte mit der totalen Transmission T, mit der die Strahlung den Weg von der Sonne zum Sensor passiert, die für die Berechnungen in dieser Arbeit aber nicht benötigt wird.

0,00E+00	0,91E-01	C0, C1, L (MILLI-W/CM*CM*SR*MICROMETER)				
ANGL	L (R= 0%)	L (R=10%)	L (R=30%)	L(R=60%)	Q(30%)	T(total)
-43,0	0,39914E-01	0,19764E+01	0,58731E+01	0,11778E+02	0,0216	0,9223
-40,3	0,36750E-01	0,19758E+01	0,58778E+01	0,11790E+02	0,0210	0,9245
-37,6	0,33985E-01	0,19754E+01	0,58819E+01	0,11801E+02	0,0205	0,9264
. . .						
37,6	0,34495E-01	0,19758E+01	0,58821E+01	0,11801E+02	0,0205	0,9264
40,3	0,36075E-01	0,19750E+01	0,58767E+01	0,11789E+02	0,0210	0,9245
43,0	0,37807E-01	0,19742E+01	0,58706E+01	0,11775E+02	0,0216	0,9223

Tabelle 7: Auszug aus einer ATM-Datei (Kanal 6, 1992)

Mit einem Programmdurchlauf, der ca. 30 Minuten (auf einer SUN Sparc 10) bei angemessen hoher Berechnungsauflösung (Δk = 50 cm^{-1}) dauert, kann immer nur ein Kanal des Daedalus simuliert werden. D.h. es dauert ca. 5 Stunden, bis für alle Kanäle die 10 ATM-Dateien zu einem bestimmten Parametersatz vorliegen.

4.2.4 Reflektanzbildberechnung – ref_image

Das von Thomas Hepp erstellte und in [HEPP 1994] vorgestellte C-Programm ref_image dient der Erzeugung von Reflektanzbildern aus den Eingaben

- Grauwertscannerbilder im TIFF-Format,
- Header-Daten im TIFF-Format,
- Kalibrierung des Daedalus-Scanners auf absolute Strahldichten und den
- ATM-Dateien (SENSAT–5) für alle Daedalus-Kanäle.

D.h., das Programm realisiert zum einen die Kalibration des Daedalus-Scanners zur Erzeugung von Strahldichtebildern (L_R, siehe Abb. 24) und andererseits das „Look-up-table"-Verfahren zur Berechnung der Reflektanzwerte (incl. linearer Interpolation).

Die Ausgabe des Programmes ist ebenfalls eine TIFF-Datei (mit 10 Bildeinträgen, eins pro Kanal), die die Reflektanzbilder beinhaltet (Dateinamenserweiterung „-cor"). Jedes Bildelement (Pixel) wird in der Datei mit 8 Bit pro Kanal repräsentiert, welche einen Zahlenbereich von 0...255 darstellen. Dabei entspricht der Wert 0 einer Reflektanz von 0 und der Wert 255 einer Reflektanz von 1.

4.2.5 Überstrahlungseffekt – adjacen

Im idealen Fall sollte nur Strahlung des zu beobachtenden Objektes auf den Sensor fallen. Durch die Streuung der Strahlung an den Luftmolekülen und Aerosolteilchen gelangt aber auch Strahlung aus der Umgebung in den Sensor. Dieser Effekt wird *Überstrahlungseffekt* (Adjacency Effect) genannt. Er tritt besonders stark bei dunklen Flächen auf, die von hellen Flächen umgeben sind.

Zur Kompensation des Überstrahlungseffektes wird von der Strahldichte jedes einzelnen Pixels ein gewichteter Mittelwert der Strahldichten der umgebenden Pixel abgezogen [HEPP 1994]. Das von Thomas Hepp erstellte Programm „adjacen“ dient der Korrektur der Bilddaten um eben diesen Effekt.

Die Ausgabe des Programmes ist wieder eine Tiff-Datei, die dann die endgültigen Reflektanzbilder enthält (Dateinamenserweiterung „-adj“).

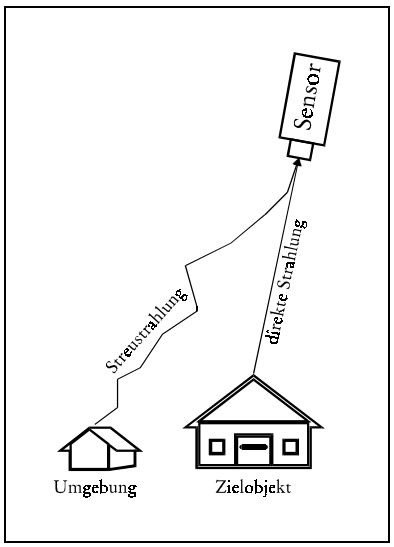


Abb. 26: Überstrahlungseffekt

4.2.6 Fehlerbetrachtung

Eine systematische Fehlerbetrachtung beim Prozeß der Reflektanzbildberechnung ist schwierig, da für viele Parameter und deren Fehler nur Schätzwerte existieren. Zur Berechnung der Strahldichten L_S und L_R (Abb. 24) sei hier angemerkt:

L_R: Die Kalibrierung mit der Daedalus–Testbench ermöglicht die Berechnung absoluter Strahldichten aus den Grauwerten des Scanners. Die Strahldichten sind dann mit einem maximalen Fehler von 10% behaftet [AMANN 1994].

L_S: Eine weitere Fehlerquelle verbirgt sich hinter den Eingabeparametern des Programmes SENSAT–5. Einige der Eingabeparameter können nur sehr ungenau bestimmt werden. So sind z.B. die Sichtweite und der Aerosoltyp (und damit der Aerosolgehalt) nur sehr vage bekannt, und der Radiosondenaufstieg wird gänzlich durch eine Standardatmosphäre ersetzt.

Zu weiteren Fehlern in den Werten der absoluten Reflektanzbildern, trägt natürlich bei, daß das Programm SENSAT–5 nur ein Modell, eine Simulation des Strahlungstransportes in der Atmosphäre darstellt. Der Fehler, der bei diesen Berechnungen entsteht ist im Rahmen dieser Arbeit nicht abschätzbar, da bei diesem komplexen Strahlungstransportmodell nur eine statistische Fehlerbestimmung in Frage kommt, bei der die Eingabeparameter variiert werden und die daraus resultierende Variationen der Ergebnisse eine Fehlergrenzabschätzung zuläßt. Die Anzahl der Eingabeparameter ist aber viel zu groß, und deren Grenzen unbekannt.

Zusätzlich zu der Kalibrierung auf absolute Strahldichten mit der Testbench der Firma Daedalus, wurde erstmalig von der DLR begonnen, den Daedalus-Scanner an einer Ulbrichtkugel (∅ ca. 2m) zu eichen. Eine Ulbrichtkugel ist eine von innen weiß gestrichene Hohlkugel, in der an verschiedenen Orten Lampen angebracht sind. Die aus einer möglichst kleinen Öffnung aus der Kugel heraustretende Strahlung ist dann nahezu homogen und dessen Intensität und Spektrum bekannt, wenn alle Daten der Lampen bekannt sind. Diese Messungen ergaben allerdings eine starke Winkelabhängigkeit, deren Ursache noch nicht geklärt werden konnte. Es ist anzunehmen, daß der Effekt eine Überlagerung einer Winkelabhängigkeit des Scanners

und einer Asymmetrie der Ulbrichtkugel ist. Somit wurde hier auf die Kalibrierung mit der Ulbrichtkugel verzichtet.

Abb. 27 zeigt für jeden Kanal das über 100 Messungen gemittelte Spektrum der Ulbrichtkugel. Die maximale Winkelabhängigkeit reicht von ca. 4% (Kanal 2-4) bis 20% (Kanal 0). Die „Treppenstufen“ in den Spektren entstehen durch die endliche Auflösung des Scanners (Grauwerte werden als ganze Zahlen erfaßt).

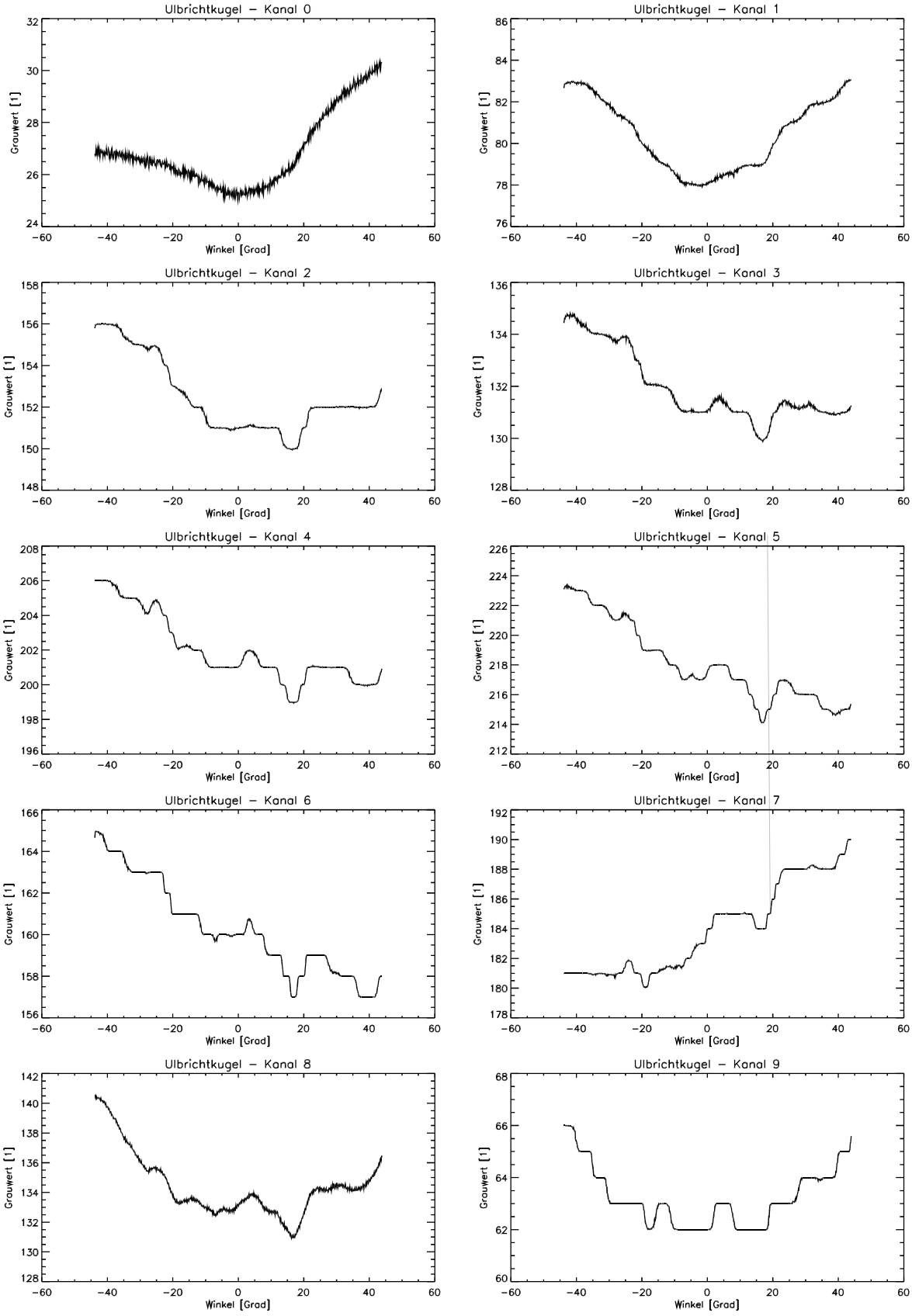


Abb. 27: Daedalus-Messungen an der 2m-Ulbrichtkugel (mit unterdrücktem Maßstab)

5 Vergleich IRIS – Daedalus

Wie in 4.2.6 erwähnt, sind die absoluten Reflektanzwerte der Daedalus-Messungen mit einem relativ großen Fehler behaftet, der zudem nur grob geschätzt werden kann. Um die Möglichkeit zu schaffen, diesen Fehler etwas präziser anzugeben, können die IRIS-Reflektanzen herangezogen werden, von denen der Fehler erstens genauer bekannt, und zweitens kleiner ist, als der der Daedalus-Reflektanzen.

Es liegt also nahe, eine Gegenüberstellung der absoluten Reflektanzen aus den IRIS- und den Daedalus-Messungen vorzunehmen.

5.1 Darstellung

Die Daten des IRIS-Spektroradiometers liegen als spektral und dynamisch hochaufgelöste Spektren von jeweils nur einer speziellen Oberfläche vor, wobei hingegen der Daedalus-Scanner ein bildgebendes System ist, das, im Gegensatz zum IRIS, eine geringe spektrale Auflösung besitzt. Um die Daten nun vergleichen zu können, bedarf es einer Aufbereitung der Daten.

5.1.1 Aufbereitung der IRIS-Spektren zum Vergleich

Von den sechs, zur Vergleichsmessung ausgewählten Testflächen wurden jeweils mehrere Spektren aufgenommen, z.T. örtlich um einige Zentimeter versetzt, um eine statistische Aussage über die Streuung der Fläche machen zu können. Es wurden daher zunächst alle Messungen von einer Testfläche zu einem Spektrum gemittelt, um den statistischen Fehler zu minimieren.

Da die IRIS-Spektren sehr viel höher aufgelöst sind als die des Daedalus-Scanners, ist es nötig, diese noch über die Spektralbereiche der einzelnen Daedalus-Kanäle zu mitteln (Abb. 28).

Dazu genügt es, das arithmetische Mittel zu berechnen, ohne die Apparatefunktionen der einzelnen Daedalus-Detektoren zu berücksichtigen, da diese ja bereits in die SENSAT-5-Berechnungen eingehen. Bei den Spektren handelt es sich um absolute Reflektanzspektren, die reine Objekteigenschaften darstellen und unabhängig von irgendeiner Apparatur sein sollten.

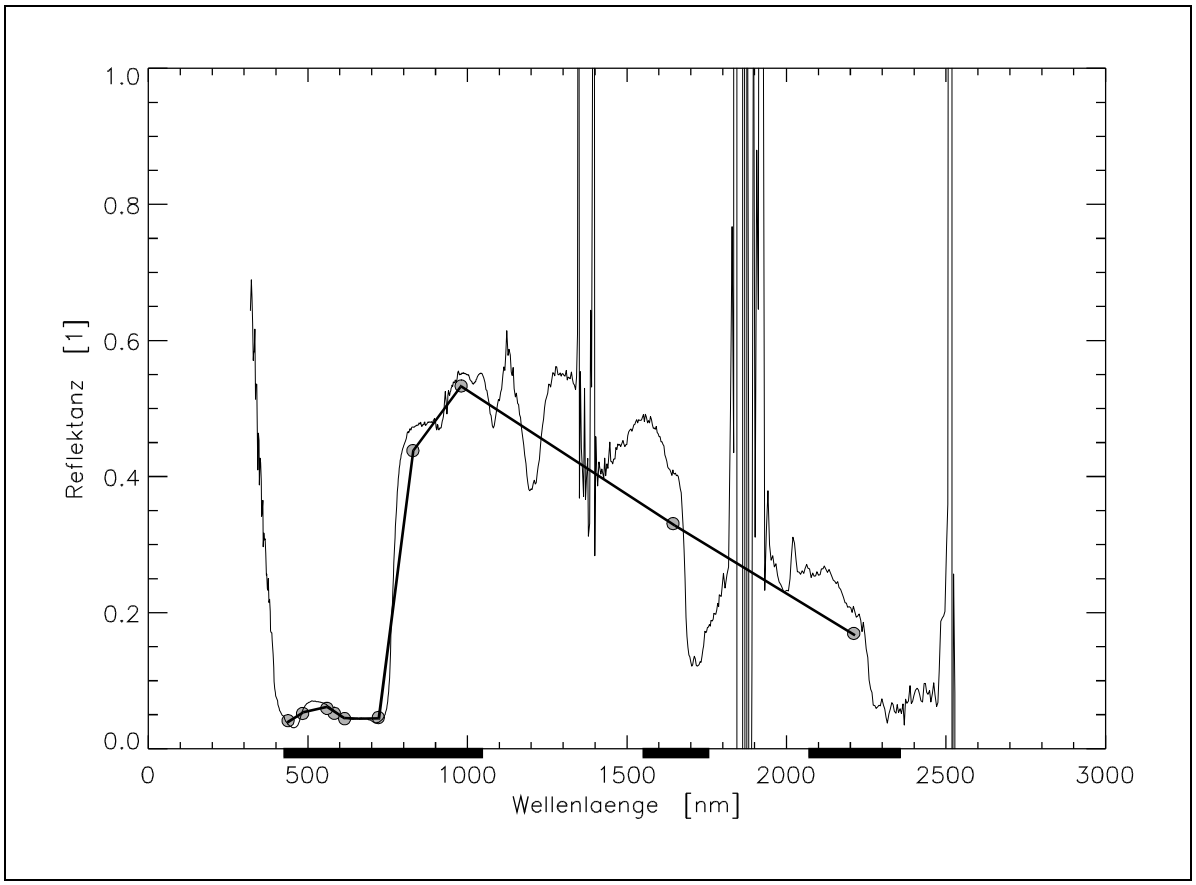


Abb. 28: IRIS-Messung (Kunstrasen) und Mittelung (graue Punkte) der IRIS-Daten über die Bereiche der Daedalus-Kanäle (schwarze Balken). Die fettgezeichnete Kurve verbindet diese Punkte zur besseren Anschauung.

Die IRIS-Reflektanzpektren weisen an einigen Stellen unphysikalische Unstetigkeiten und z.T. sogar negative Werte auf (Abb. 28). Die Erklärung hierfür liegt in der Division und Subtraktion kleiner Zahlen. Es läßt sich beobachten, daß diese Unstetigkeiten dort auftreten, wo sich starke Wasserdampf–Absorptionsbanden der Atmosphäre befinden, was bedeutet, daß das IRIS-Spektroradiometer sehr schwache Strahldichten sowohl von der Referenz- als auch von der Zielfläche aufnimmt. Von diesen, im Meßdatensatz als sehr kleine Zahlen repräsentierten, Meßwerten wird dann für die Berechnung der Reflektanzen der Dunkelstrom abgezogen und anschließend der Quotient gebildet. Da nun die Dunkelstrommessung und die Strahldichtemessungen mit Schwankungen versehen sind (Rauschen etc.), kann es vorkommen, daß der Quotient einen sehr großen oder sehr kleinen Wert annimmt (oder sogar undefiniert ist, wenn der Referenzwert an einer Stelle null ist).

Es ist natürlich kein Zufall, daß keiner der Daedalus-Kanäle eine Überlappung mit diesen Unstetigkeitsbereichen aufweist. Der Daedalus-Scanner hat ganz bewußt dort keine Kanäle, wo Absorption der atmosphärischen Gase auftritt und deshalb kein starkes Meßsignal zu erwarten ist.

Die Mittelwertbildung der IRIS-Spektren über die Daedalus-Kanäle erfolgte mit einem in IDL geschrieben Programm (`todaed.pro`).

5.1.2 Aufbereitung der Daedalus-Spektren zum Vergleich

Um die Spektren aus den Daedalus-Bildern mit den IRIS-Messungen zu vergleichen, mußten vorerst die IRIS-Meßorte auf den Bildern gefunden werden. Diese einfache Arbeit wurde auf rein visuelle Weise durchgeführt und brachte das Ergebnis in Abb. 5 und Abb. 6 (die Meßorte sind zu finden in den Flugstreifen NUER03, NUER07 und NUER13).

Nach Auffindung der Meßorte wurde daß Reflektanzspektrum dieses Ortes aus dem Mittelwert der Spektren von möglichst vielen, den jeweiligen Punkt umgebenden Bildelementen (Pixeln) bestimmt. Die Umgebung konnte mit Hilfe eines IDL-Programmes (`clippolyzoom.pro`) von Rafael Wiemker, Universität Hamburg, in Form eines Polygons direkt im Scannerbild gezeichnet werden (Abb. 29).

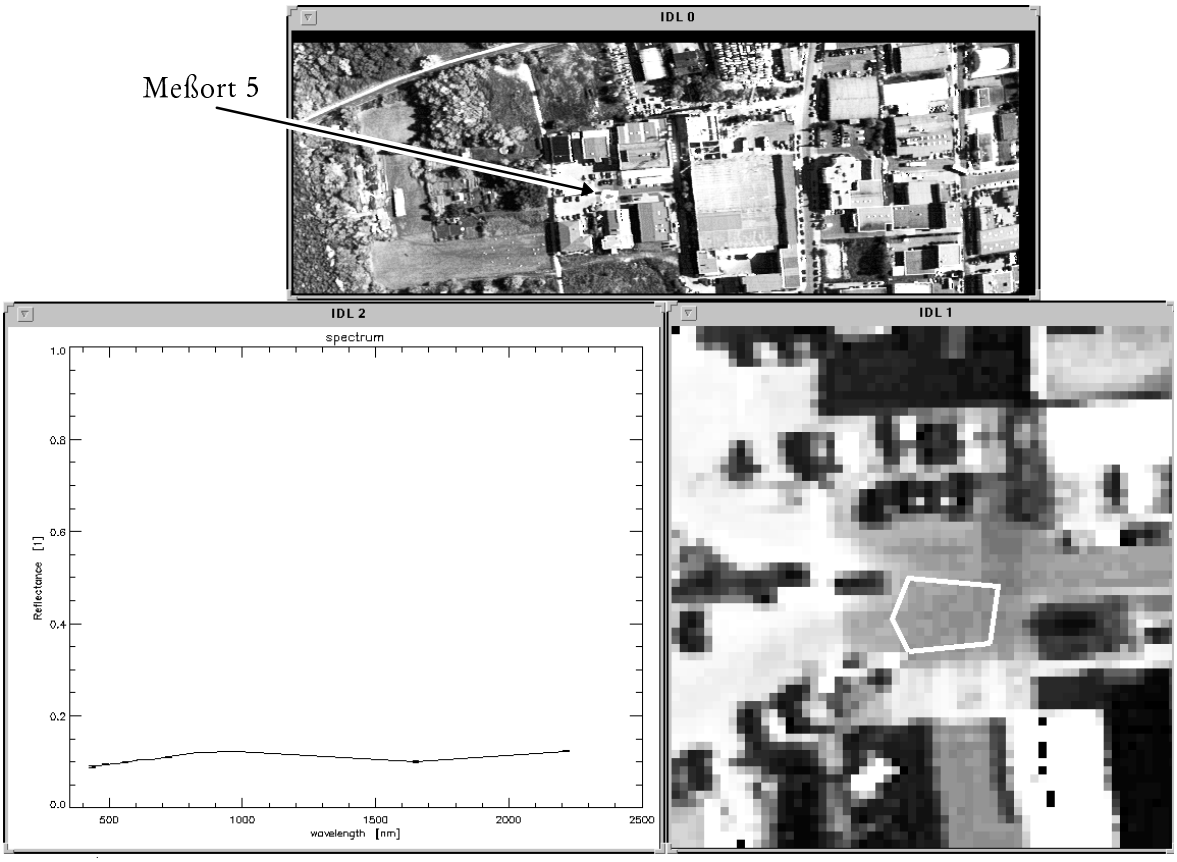


Abb. 29: Ausgabe des Programmes „clippolyzoom“ für Meßort 5 (siehe Pfeil, links unten: Reflektanzspektrum mit Fehlerbalken)

Das Programm erzeugte eine Ausgabedatei, die das Mittelwertspektrum sowie die Standardabweichung der Umgebungspixel enthielt. Das Polygon konnte bei allen Meßorten so gewählt werden, daß die Umgebung mindestens 20 Pixel umfaßte und die relative Standardabweichung der relativen Reflektanz unter 0,5% lag.

5.1.3 Gegenüberstellung

Als einfache und naheliegende Darstellung der Spektren bietet sich Abb. 30 an. Damit ist es möglich, einen ersten Eindruck von der Übereinstimmung der Messungen zu bekommen. Als

Testflächen wurden, wie schon in 3.2.3 erwähnt, folgende Orte in Nürnberg und Umgebung gewählt:

1. neugebautes Flughafenvorfeld (West), noch nicht in Betrieb – heller Asphalt
2. Asphaltstreifen zwischen altem Vorfeld und Rasenfläche – dunkler Asphalt
3. Tennisplatz
4. Kunstrasen – Fußballfeld
5. Straßenasphalt im Gewerbegebiet – dunkler Asphalt
6. Naturrasen – Fußballfeld

Es fällt auf, daß die Spektren des IRIS im kurzwelligen Bereich ($\lambda \leq 1500$nm) bei nahezu allen Messungen bis zu 35% unterhalb (außer bei Testfläche 3), und im langwelligen bis zu 25% oberhalb der Daedalus-Spektren liegen. Zu vermuten ist deshalb, daß es sich bei diesen Differenzen um eine systematische Abweichung handelt.

Die Darstellung in Abb. 31 zeigt für jeden Daedalus-Kanal einen Graphen, in dem die Reflektanzwerte des IRIS gegen die des Daedalus linear aufgetragen sind. Mit Hilfe dieser Abbildung läßt sich nun relativ leicht erkennen, daß zwischen den IRIS- und den Daedalus-Reflektanzen ein linearer Zusammenhang bestehen könnte, denn die Meßorte liegen mit nur geringer Streuung auf einer Geraden. Im Idealfall sollte diese Gerade die Steigung eins haben, und durch den Nullpunkt verlaufen, dann wären die Reflektanzspektren identisch. Die Regressionsgeraden, berechnet aus den Meßorten, verläuft auch annähernd durch den Nullpunkt. Die Steigung jedoch weicht von eins ab, so daß es möglich ist, die Spektren durch einen Korrekturfaktor, der für jeden Daedalus-Kanal getrennt zu berechnen ist, weitgehend zur Deckung zu bringen.

Um Fehlinterpretationen vorzubeugen, wurde in Abb. 30, Abb. 32 und Abb. 33 bewußt auf die Darstellung der Fehlerbalken verzichtet, da der Fehler der Daedalus-Reflektanzen erstens nahezu unbekannt und zweitens vermutlich nicht statistischer Natur ist. So wurde bei der Interpretation auch mehr Augenmerk auf die qualitative als auf die quantitative Übereinstimmung der Reflektanzspektren gelegt.

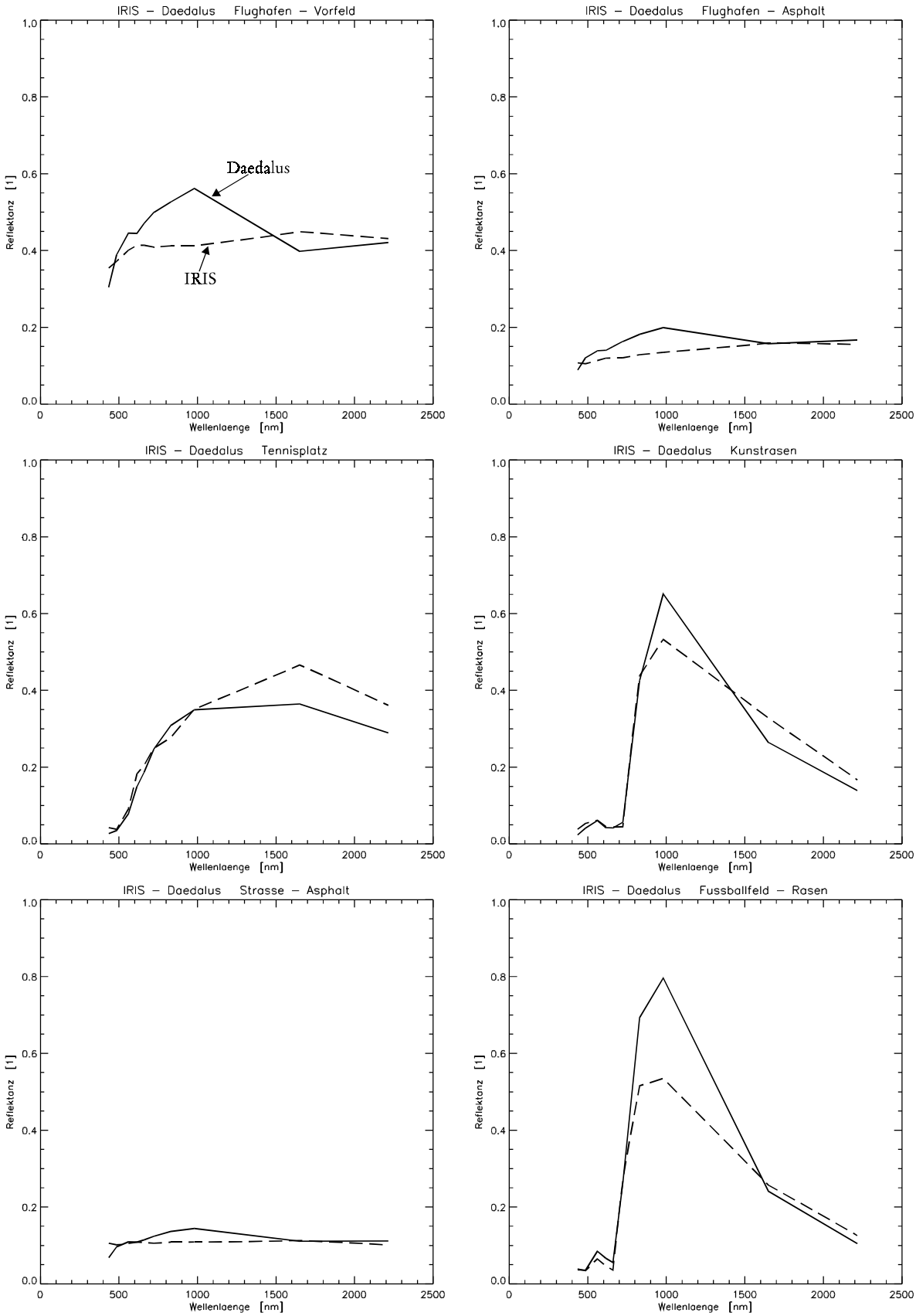


Abb. 30: Gegenüberstellung der Messungen IRIS – Daedalus

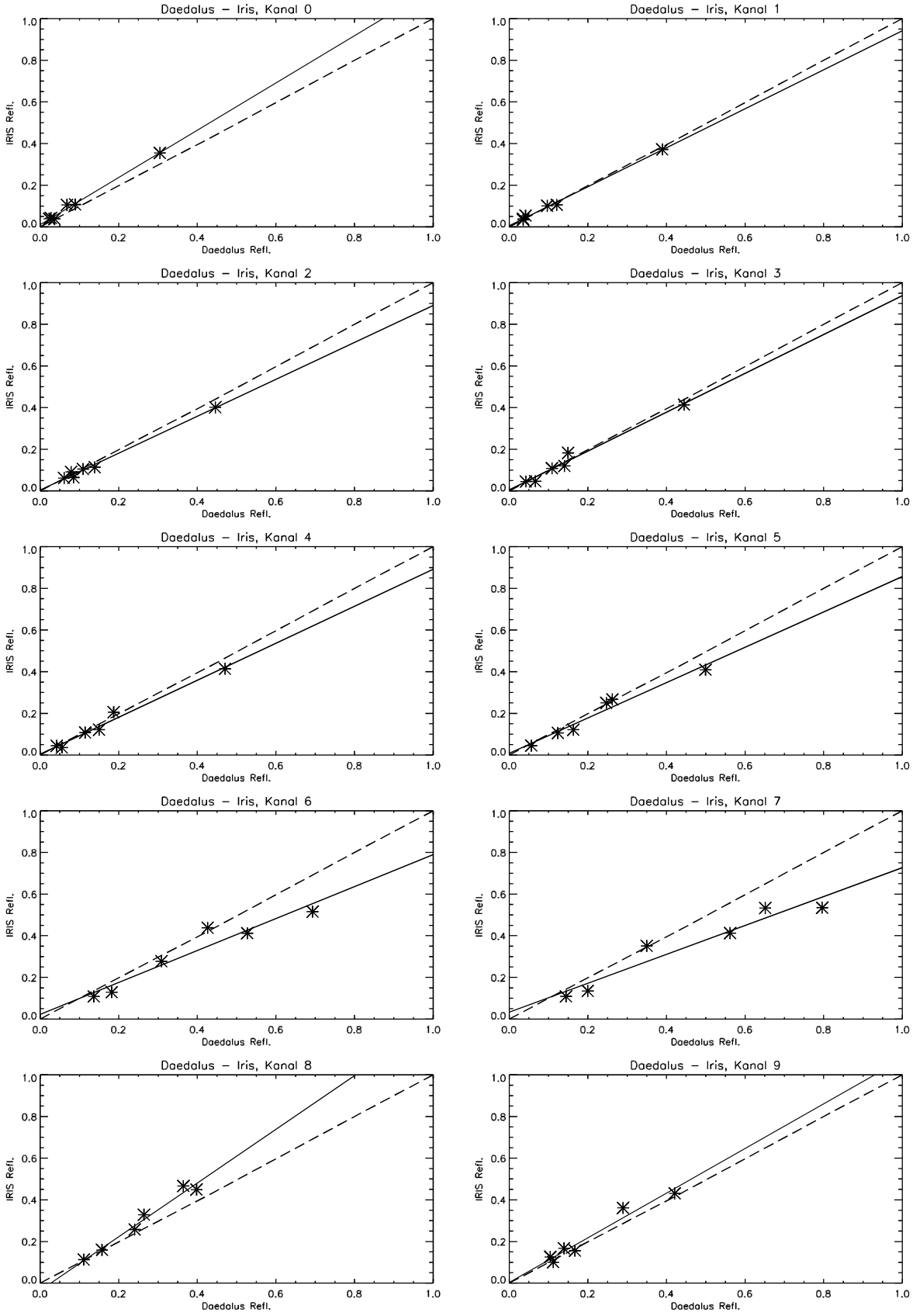


Abb. 31: Statistischer Zusammenhang zwischen IRIS- und Daedalus-Messungen (gestrichelt = optimale Übereinstimmung)

An dieser Stelle ist nun zu entscheiden, welche der beiden Messungen (IRIS oder Daedalus) die „richtigere“ ist, also die, die den tatsächlichen Reflektanzwerten am nächsten kommt.

Wie in 5.2 diskutiert, wird angenommen, daß sich mit den IRIS-Messungen die Reflektanzen besser bestimmen lassen als mit denen des Daedalus. Das bedeutet, daß in der langen Kette der Messungen und Berechnungen zur Erzeugung der Reflektanzbilder aus den Daedalus-Daten ein undefinierter Fehler vorhanden sein muß.

Schon erwähnt wurde, daß ein Fehler in den Daedalus-Reflektanzwerten zu vermuten ist, der sich in jedem Kanal nur durch einen konstanten Faktor (einen pro Kanal) von den „echten“ (IRIS–) Daten unterscheidet. Diese Korrekturfaktoren entsprechen den Steigungen der Regressionsgeraden in Abb. 31.

Werden nun die Reflektanzbilder mit diesen Faktoren korrigiert, so ergibt sich bei erneuter Gegenüberstellung mit den IRIS-Messungen Abb. 32. Dieses Ergebnis ist wenig zufriedenstellend. Ursache hierfür könnte sein:

- Die Daedalus-Reflektanzwerte zeigen so gut wie keinen systematischen Zusammenhang mit den „echten“ Reflektanzwerten.
- Der Fehler der Daedalus-Reflektanzen läßt sich nicht linear korrigieren.
- Zur Bestimmung der Korrekturfaktoren wurden auch Meßorte herangezogen, deren Reflektanzwerte, durch erklärbare Ursache, Differenzen zwischen den IRIS– und den Daedalus-Messungen zeigen dürfen.

Der erste Punkt dieser Überlegungen scheint nicht zutreffend zu sein, da sowohl der Daedalus-Scanner, als auch sämtliche Bearbeitungsschritte zur Erzeugung der Reflektanzbilder die Annahme zulassen, daß die Ergebnisse (Bilder) keine Anhäufung von Zufallszahlen sind.

Der zweite Punkt kann nicht so ohne weiteres verworfen werden. Der Aufwand, einen nichtlinearen Zusammenhang zu finden, ist aber relativ groß. Es erscheint sinnvoll, sich zuerst am dritten Punkt zu versuchen. Dieser dritte Punkt wird sich im Folgenden als richtig herausstellen.

Um herauszubekommen, ob sich unter den sechs Meßflächen einige befinden, die nicht geeignet sind, um für die „Eichung“ des Daedalus herzuhalten, müssen zuerst die Meß– und Aufnahmebedingungen betrachtet werden. Augenscheinliche Differenzen der Aufnahmegeometrien zwischen den Daedalus- und den IRIS-Messungen sind:

- Der Daedalus-Scanner tastet die Oberfläche in Winkeln zwischen -43° und +43° ab. Das IRIS hingegen mißt immer senkrecht zur Meßfläche (Zenith).
- Die Messungen von Daedalus und IRIS sind i.a. nicht zeitgleich erfolgt, so daß sich der Sonnenstand von IRIS- zu Daedalus-Messung unterscheidet.

Diese möglichen unterschiedlichen Aufnahmebedingungen können insbesondere bei Oberflächen, die von dem Modell des Lambert-Reflektors stark abweichen, zu Differenzen in den Reflektanzwerten führen. Es ist demnach sinnvoll, nur Flächen in die Daedalus-Korrektur einfließen zu lassen, die möglichst wenig vom Lambert-Reflektor abweichen.

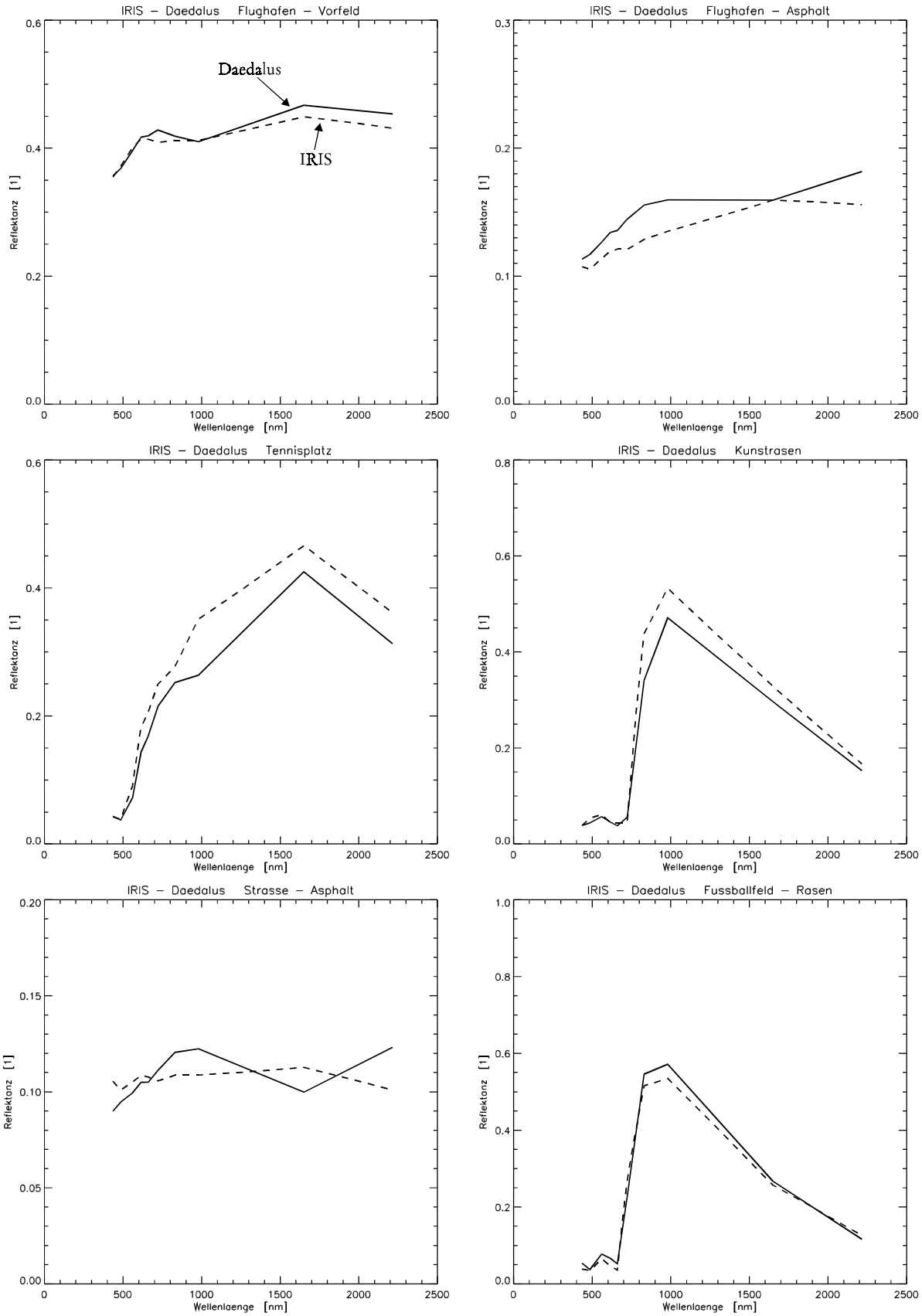


Abb. 32: Gegenüberstellung der Messungen IRIS – Daedalus.
Korrektur der Daedalus-Spektren mit allen IRIS-Testflächen

Betrachtet man die Strukturen der Oberflächen, so ergeben sich für die einzelnen Meßflächen folgende Aussagen:

- *Kunstrasen und Fußballfeld–Rasen (Flächen 4 und 6)*: Der Kunstrasen und der natürliche Rasen (Fußballfeld) zeigen eine große Ähnlichkeit, nicht nur in ihrer Oberflächenstruktur, sondern auch in den Spektren. Die beiden Rasenflächen bestanden aus ca. 3–4 cm hohen Grashalmen, die, wie es für Vegetation typisch ist, sehr viel Schatten erzeugen. Diese Schattenbildung führt dazu, daß ein Beobachter mit einer Blickrichtung, die einen kleinen Winkel mit der Sonnenstrahlung einschließt, weniger von dem Schatten sieht, als ein Beobachter der „gegen die Sonne" blickt, da der Schatten aus Richtung der Sonne betrachtet, von den Gräsern teilweise (bis zu 50%) verdeckt wird („Hot-Spot-Effekt"). Die Annahme, diese Flächen seien Lambert–Reflektoren ist also absolut unzutreffend.

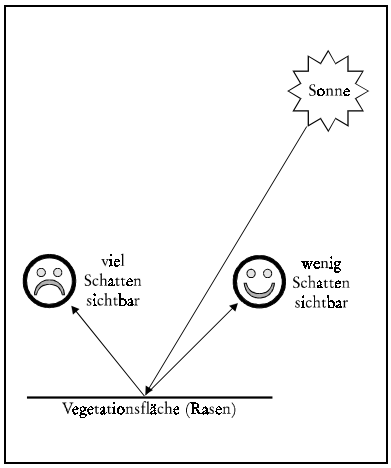


Abb. 33: Messung von Rasen und Tennisplatz

- *Tennisplatz (Fläche 3)* : Dieser Tennis–Sandplatz war belegt mit einem roten, groben, sandähnlichen Granulat. Dieses Granulat, das zum großen Teil locker auf einer festeren Schicht liegt, zeigt ähnliche Eigenschaften, wie die Grasfläche, da auch hier eine Schattenbildung der Granulatteilchen zu erkennen ist.
- *Flughafen–Vorfeld, Flughafen–Asphalt und Straße–Asphalt (Flächen 1, 2 und 5)*: Diese Oberflächen sind makroskopisch gesehen sehr glatt. Im Gegensatz zu den Rasenflächen und dem Tennisplatz tritt hier keine Schattenbildung auf, was die Annahme zuläßt, daß diese Flächen unter den 6 Meßflächen dem Lambert–Reflektor am ähnlichsten sind. Mikroskopisch betrachtet, sind die Oberflächen rauh, so daß die spiegelnde Komponente klein ist.

Diese Überlegungen führten zu der Entscheidung, eine Kalibrierung des Daedalus–Scanners nur mit den Flächen 1,2 und 5 durchzuführen (siehe Tabelle 8). Die Gegenüberstellung Daedalus–IRIS mit dieser Korrektur ergibt Abb. 34. Aus der Abbildung ist zu ersehen, daß die Übereinstimmung der Messungen bei den Asphaltflächen jetzt sehr gut ist (was keine Selbstverständlichkeit ist, obwohl diese Flächen die Grundlage zur Korrektur darstellen). Aber auch die Reflektanzen der anderen Flächen zeigen qualitativ eine deutlich bessere Übereinstimmung der Spektren.

Kanal	Offset	Faktor
0	0,02	1,09
1	0,00	0,95
2	0,00	0,90
3	0,00	0,93
4	0,00	0,88
5	0,00	0,83
6	-0,01	0,79
7	0,00	0,74
8	-0,02	1,18
9	-0,02	1,07

Tabelle 8: Korrekturfaktoren für die Daedalus-Reflektanzberechnung

Es läßt sich also festhalten, daß es durchaus möglich ist, eine gute Kalibrierung des Daedalus-Scanners mit IRIS–Messungen an gut ausgewählten Flächen vorzunehmen. Wichtig ist dabei vor allem, daß diese Flächen dem Modell des Lambert-Reflektors möglichst nahe kommen.

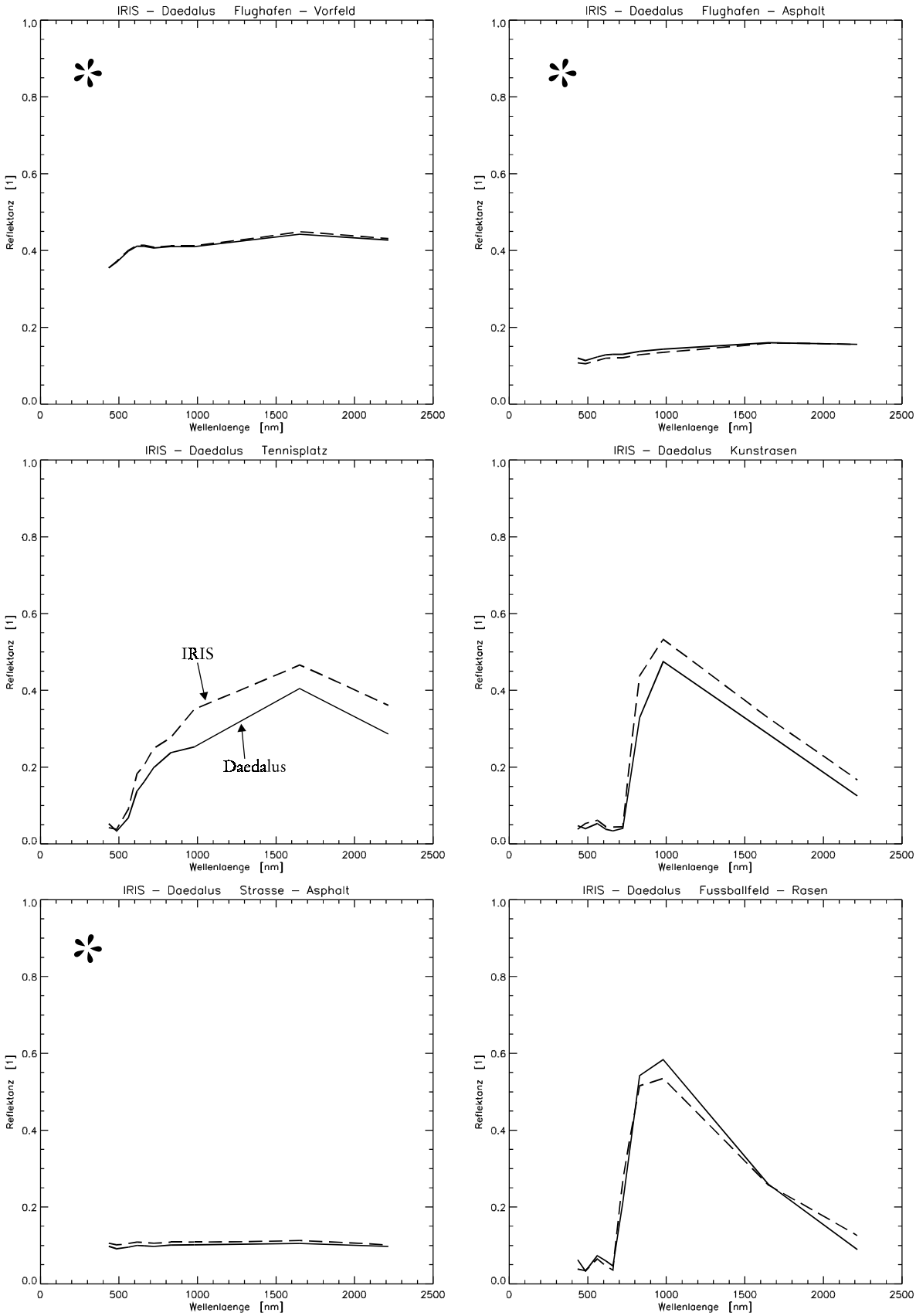


Abb. 34: Gegenüberstellung der Messungen IRIS – Daedalus.
Korrektur der Daedalus-Spektren mit ausgewählten IRIS-Testflächen (*)

5.2 Vergleich mit Daedalus-Messungen aus Vorjahren

Zur Entscheidung, die IRIS-Messungen den Daedalus-Eichungen mit der Testbench zur Kalibrierung des Daedalus-Scanners vorzuziehen, hat nicht unwesentlich die Gegenüberstellung der Daten mit Daedalus-Messungen aus Vorjahren beigetragen. Diese Messungen aus den Jahren 1991 und 1992 wurden zwar auch, wie die Daten aus 1994, ohne Bodenmessungen kalibriert, jedoch zeigen die Reflektanzwerte aus diesen Jahren qualitativ eine bessere Übereinstimmung mit den IRIS-Daten als mit den Daedalus-Daten aus 1994 (Abb. 35). Diese Tatsache läßt sich eventuell damit erklären, daß bei der Kalibrierung mit der Daedalus-Testbench 1994 ein Fehler gemacht wurde. Besonders Kanal 8 des Daedalus zeigt systematisch „Ausreißer nach oben". Kanal 9 hingegen zeigt bei allen Meßorten zu kleine Werte.

Der Meßort „Flughafen–Vorfeld" konnte nicht mit 1991 und 1992 verglichen werden, da diese helle Asphaltfläche erst 1994 erbaut wurde.

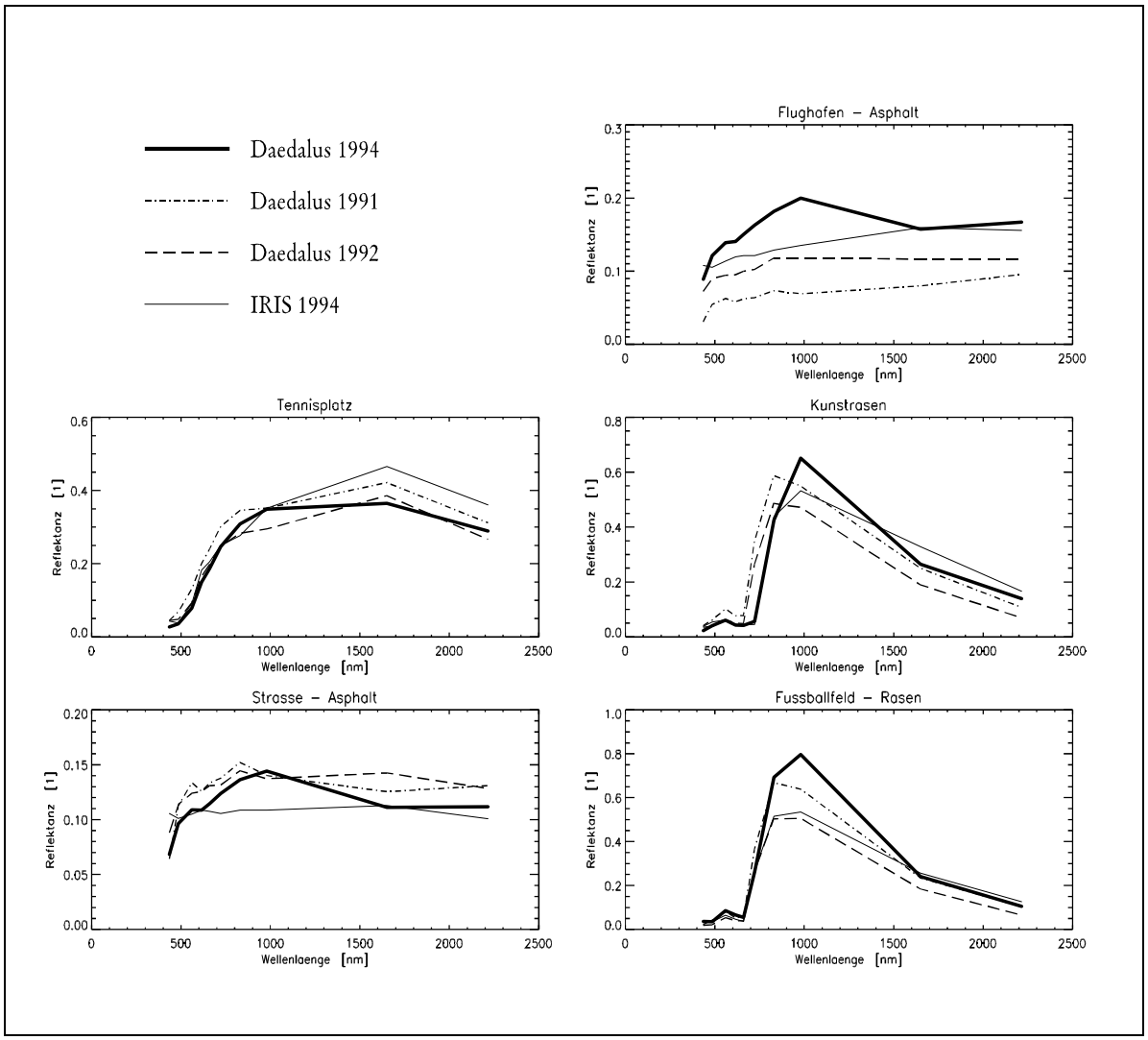


Abb. 35: Gegenüberstellung der Jahre 1991, 1992 und 1994 und der IRIS-Meßdaten

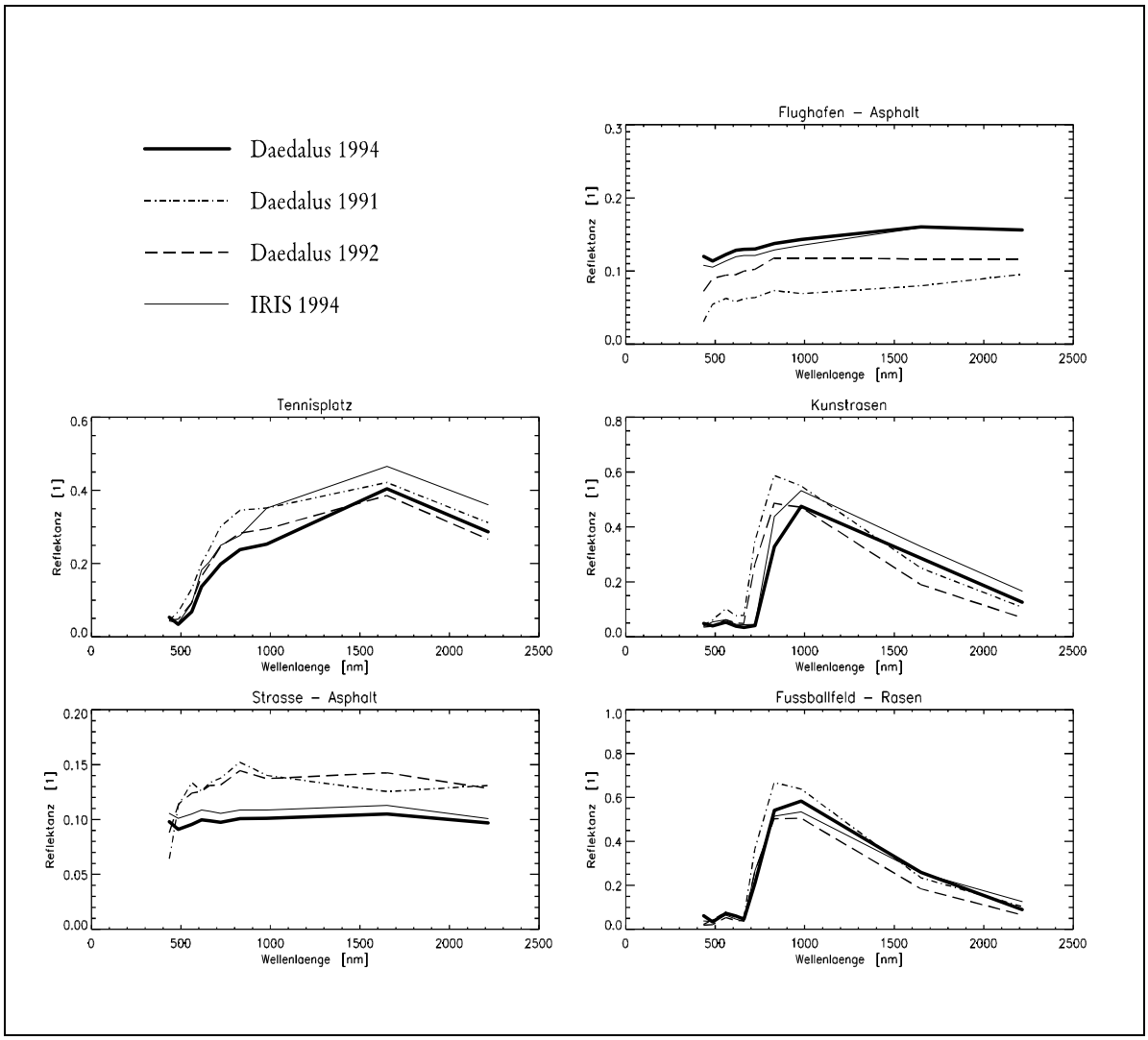


Abb. 36: Gegenüberstellung der Jahre 1991, 1992 und 1994 und der IRIS-Meßdaten (die Daedalus-Daten von 1994 mit den IRIS-Bodenmessungen korrigiert)

Abb. 36 zeigt schließlich die Gegenüberstellung der Daten mit der Kalibrierung des Daedalus durch die IRIS-Messungen. Ein Versuch, die in dieser Abbildung noch auftretenden quantitativen Differenzen zu erklären, ergibt folgendes:

- *Tennisplatz*: Der Tennisplatz ist keine natürliche Fläche, und die Oberflächenbeschaffenheit hängt stark davon ab, ob auf dem Platz gerade gespielt, oder frisch gefegt wurde. Der Platz wird außerdem regelmäßig mit Wasser besprengt, so daß der Feuchtigkeitsgehalt der Oberfläche variieren kann.
- *Kunstrasen*: Wie Nachfragen ergaben, wird auch der Kunstrasen regelmäßig feuchtgehalten. Durch die anzunehmende Anreicherung mit Moos und Algen ist so der für Vegetation typische Anstieg im nahen Infrarot zu erklären. Außerdem gilt, wie auch für den Naturrasen (Fußballfeld), daß die Reflektanz stark vom Sonnenstand abhängt (vgl. „Hot-Spot-Effekt“, S. 51).
- *Fußballfeld-Rasen*: Zusätzlich zum Hot-Spot-Effekt kommt beim Naturrasen, wie bei allen anderen Vegetationsflächen, natürlich noch die jahreszeitlichen Schwankungen hinzu.
- *Straße-Asphalt*: Diese Fläche erscheint 1994 dunkler als 1991/1992. Eine mögliche Erklärung wäre der Gummiabrieb der Fahrzeugreifen.

- *Flughafen*-Asphalt: Die großen Differenzen, die bei dieser Fläche über die Jahre auftreten, bedurften einer genaueren Untersuchung, die im Folgenden aufgezeigt ist.

Die rein visuelle Betrachtung dieser Meßfläche (Abb. 37) läßt schon vermuten, daß die Asphaltfläche von einer Messung zur nächsten erneuert wurde. Der Vergleich mit der Start-/Landebahn des Flughafens zeigt dies deutlich. Diese behält ihre Reflektanz annähernd bei, wie auch der Gegenüberstellung der Spektren in Abb. 38 zu entnehmen ist. So läßt sich das Ansteigen der Helligkeit des Meßortes „Flughafen-Asphalt“ mit einer jährlichen Erneuerung der Oberfläche erklären.

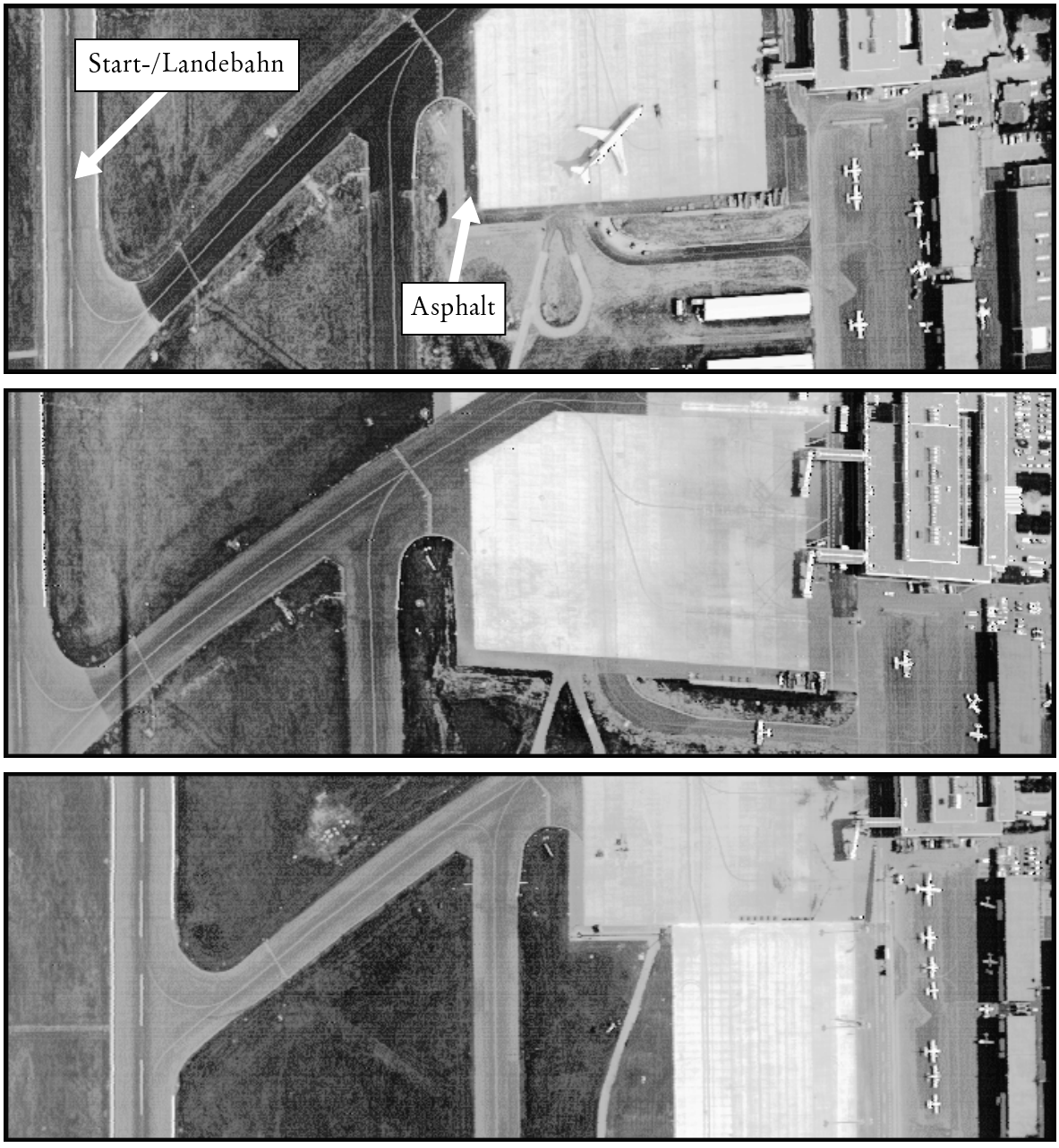


Abb. 37: Entwicklung der Meßfläche „Flughafen-Asphalt“ von 1991, 92 und 94 (Kanal 3)

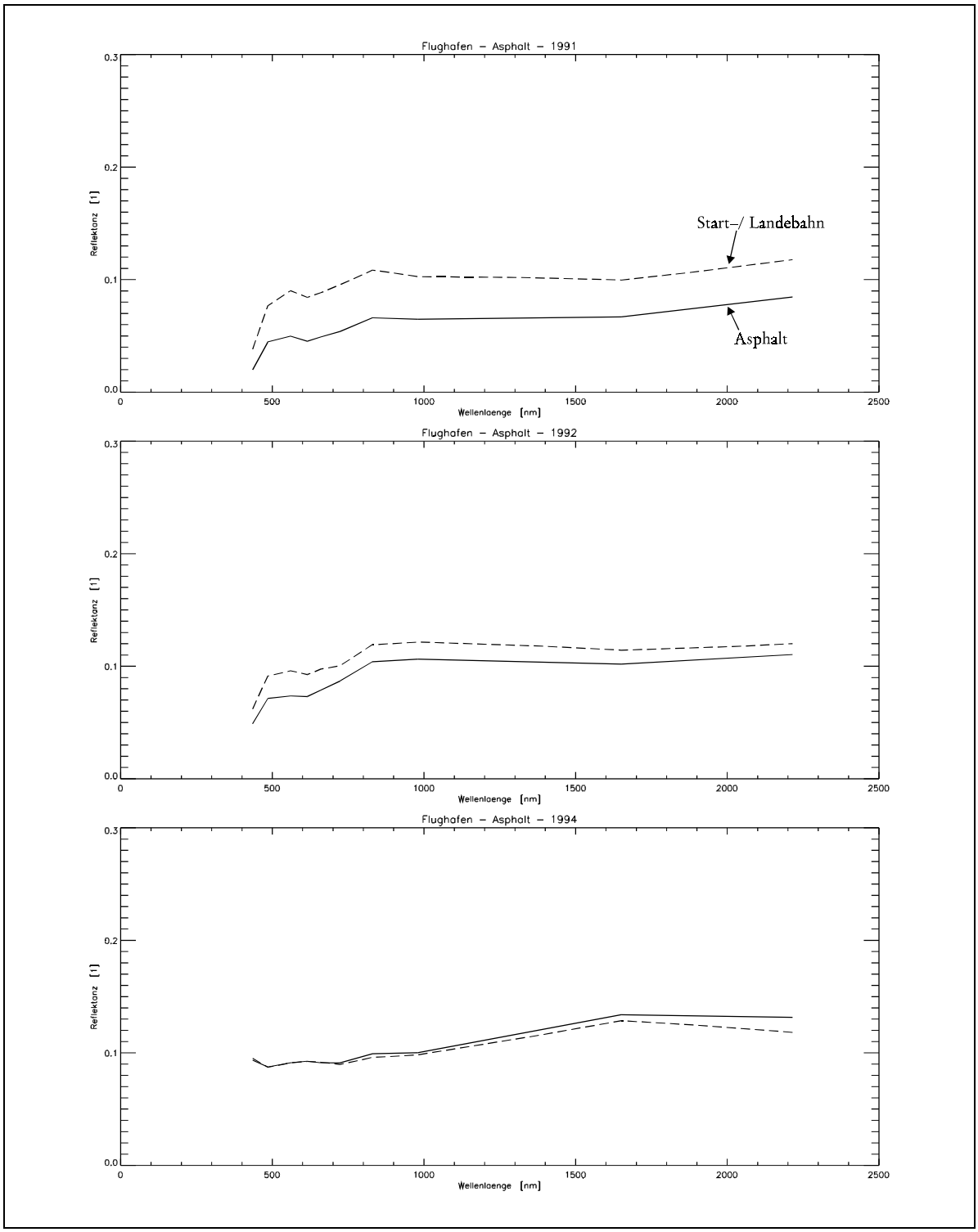


Abb. 38: Reflektanzspektren des Meßortes „Flughafen–Asphalt“ von 1991, 92 und 94

An diesem Beispiel wird sehr deutlich, daß es bei einem Auswahlvorgang von Meßflächen zu multitemporalen Vergleichszwecken dringend notwendig ist, nicht nur die physikalisch-strukturellen Eigenschaften der Oberflächen zu kennen, sondern auch die Möglichkeiten der zeitlichen Änderungen abschätzen zu können. Diese Veränderungen, die eventuell sehr klein sind, lassen sich bei den meisten Oberflächen nur sehr schwer bestimmen oder gar berechnen, so daß bei einem quantitativen Vergleich von Messungen von ein und derselben Fläche zu verschiedenen Zeitpunkten Vorsicht geboten ist.

6 Klassifikation

Wie eingangs erwähnt, dienen Reflektanzbilder dazu, einen automatischen multitemporalen Vergleich eines Luftbildes zu ermöglichen. Für diesen Vergleich werden zunächst (möglichst) alle Objekte bestimmten Oberflächenklassen zugeordnet. Eine Oberflächenklasse wird repräsentiert durch eine spektrale Reflektanz. Liegt ein Satz von Klassen vor, so kann jedes Bildelement (Pixel) der Klasse zugeordnet werden, dessen Reflektanzspektrum dem des Bildelementes am ähnlichsten ist. Dieses „Ähnlichkeit" wird in diesem Fall bestimmt durch die minimale euklidische Distanz des Bildelementes zum Klassenzentrum im spektralen Merkmalsraum (siehe [HEPP]).

Anhand einer Beispielszene der Überfliegung 1991 aus dem Industriegebiet der Stadt Nürnberg (Abb. 39) wurde eine unüberwachte Klassifikation durchgeführt. Diese unüberwachte Klassifikation bildet alle Bildelemente einer Szene in den spektralen Merkmalsraum ab, um anschließend aus den Zentren von Anhäufungen im Merkmalsraum eine vorher festgelegte Anzahl von Klassen zu bilden.

Diese so bestimmten Klassen wurden anschließend verwendet, um die Reflektanzbilder derselben Szene von 1992 und 1994 zu klassifizieren (sämtliche Bilder wurden ausschließlich mit dem Verfahren der Reflektanzbildberechnung mit Hilfe der Atmosphärenkorrektur durchgeführt). Abb. 40 bis Abb. 45 zeigen die Klassifikationen für 3, 5, 7, 9, 11 und 13 Klassen aus der unüberwachten Klassifikation. Alle Klassifikationsbilder wurden nach der Klassifikation mit einem Medianfilter mit der Fenstergröße von 3x3 Bildelementen bearbeitet.

Um die Güte der Reflektanzbildberechnungen zu überprüfen, wurde an zehn ausgewählten Punkten der Szene (Abb. 39) die Übereinstimmung der Klassifikation über die drei verschiedenen Jahre ausgezählt. Das Ergebnis zeigt Tabelle 9.

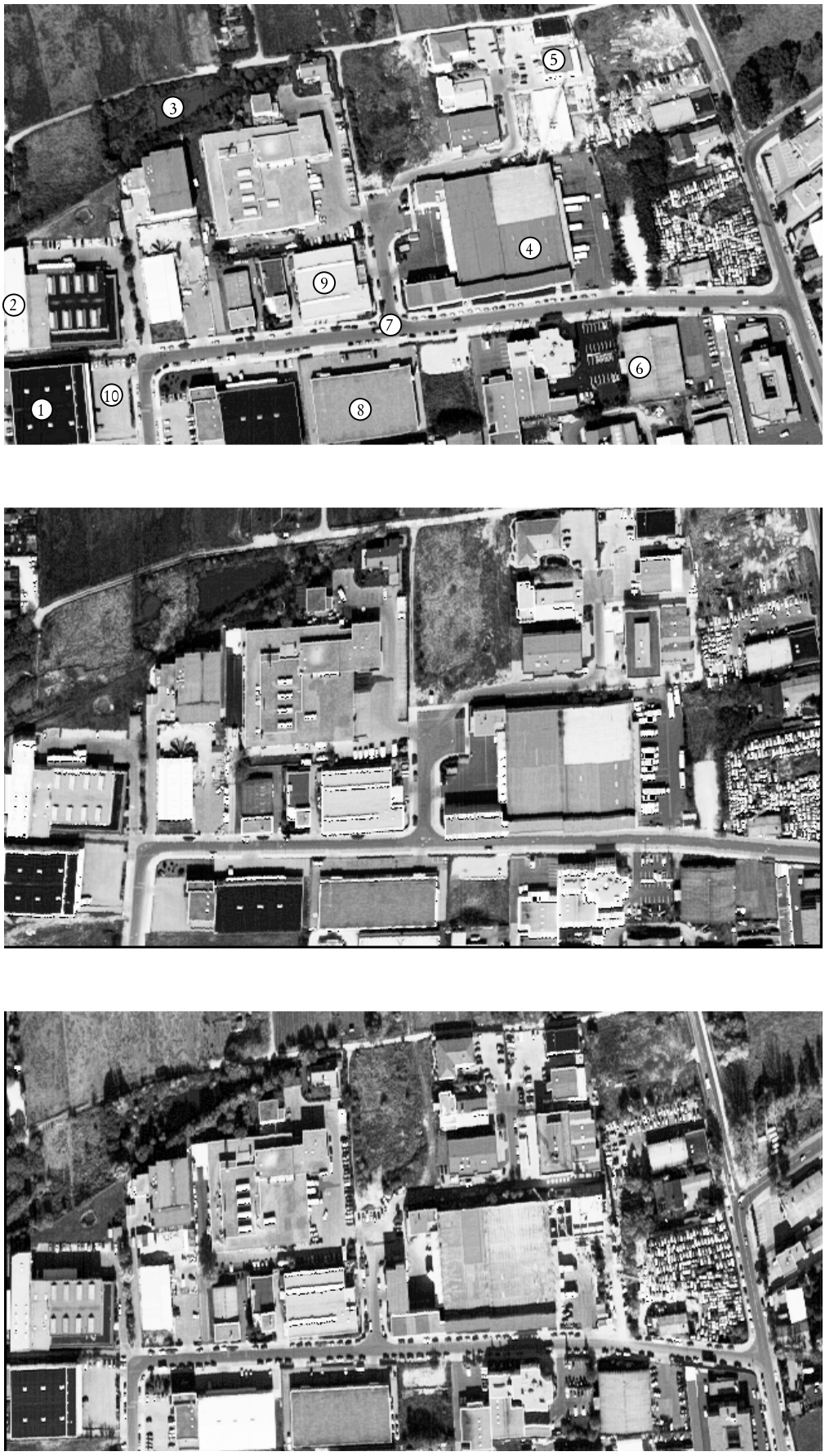


Abb. 39: Szene aus dem Industriegebiet Nürnberg 1991, 1992 und 1994 (v.o.n.u.) mit den Klassifikationstestpunkten im Bild 1991 (Kanal 3, kontrastverstärkt)

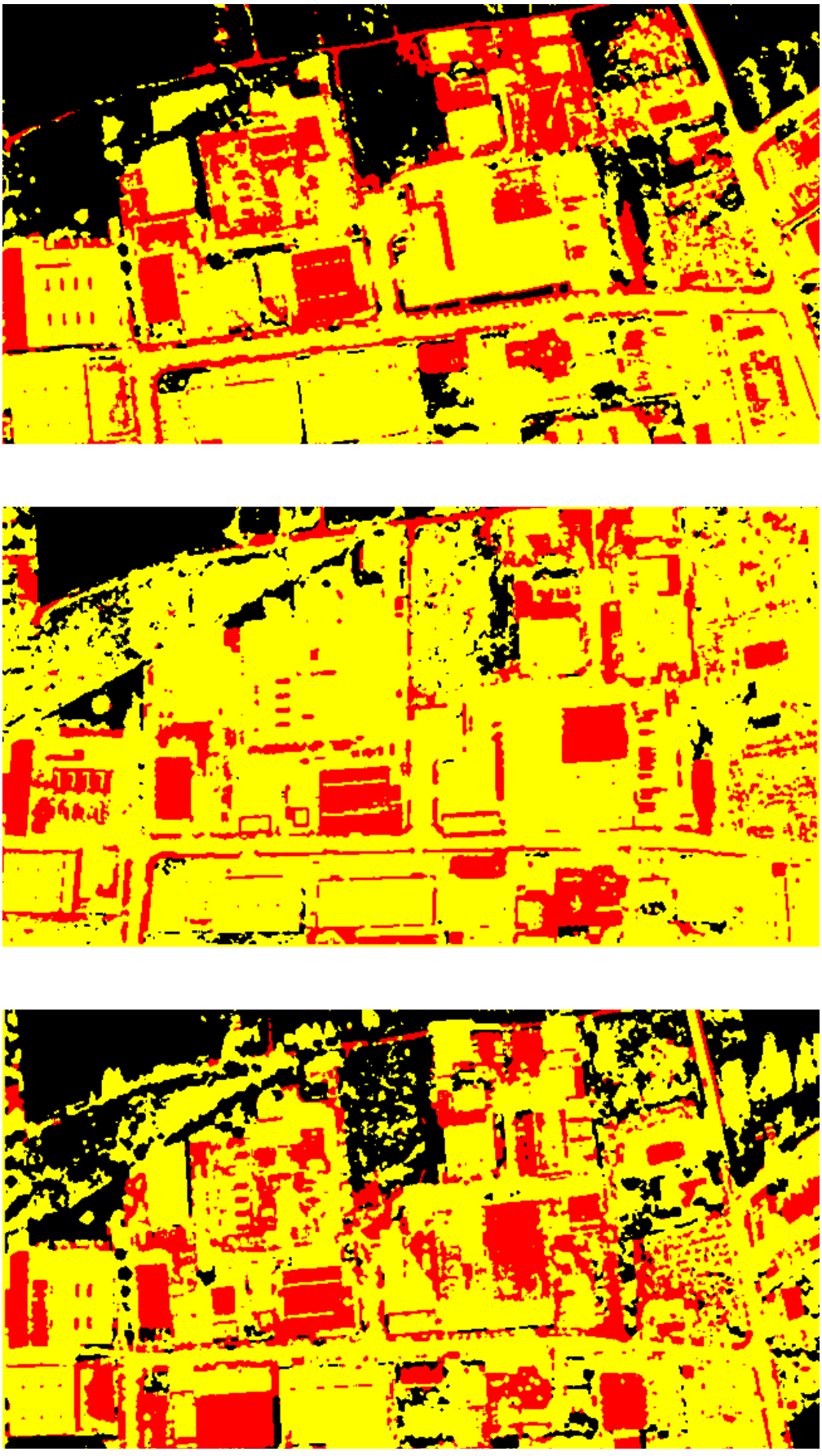


Abb. 40: Klassifikation mit 3 Klassen

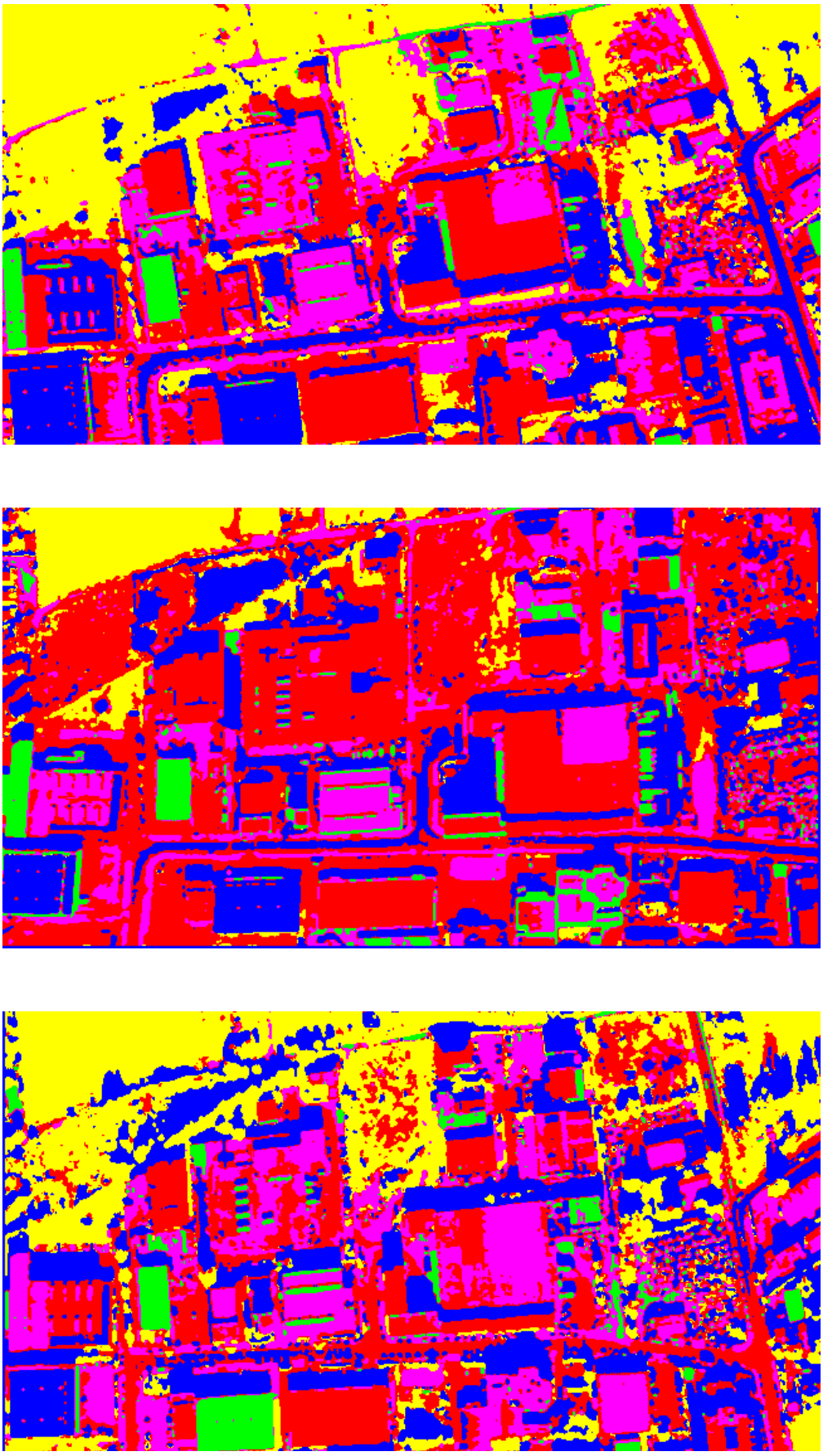


Abb. 41: Klassifikation mit 5 Klassen

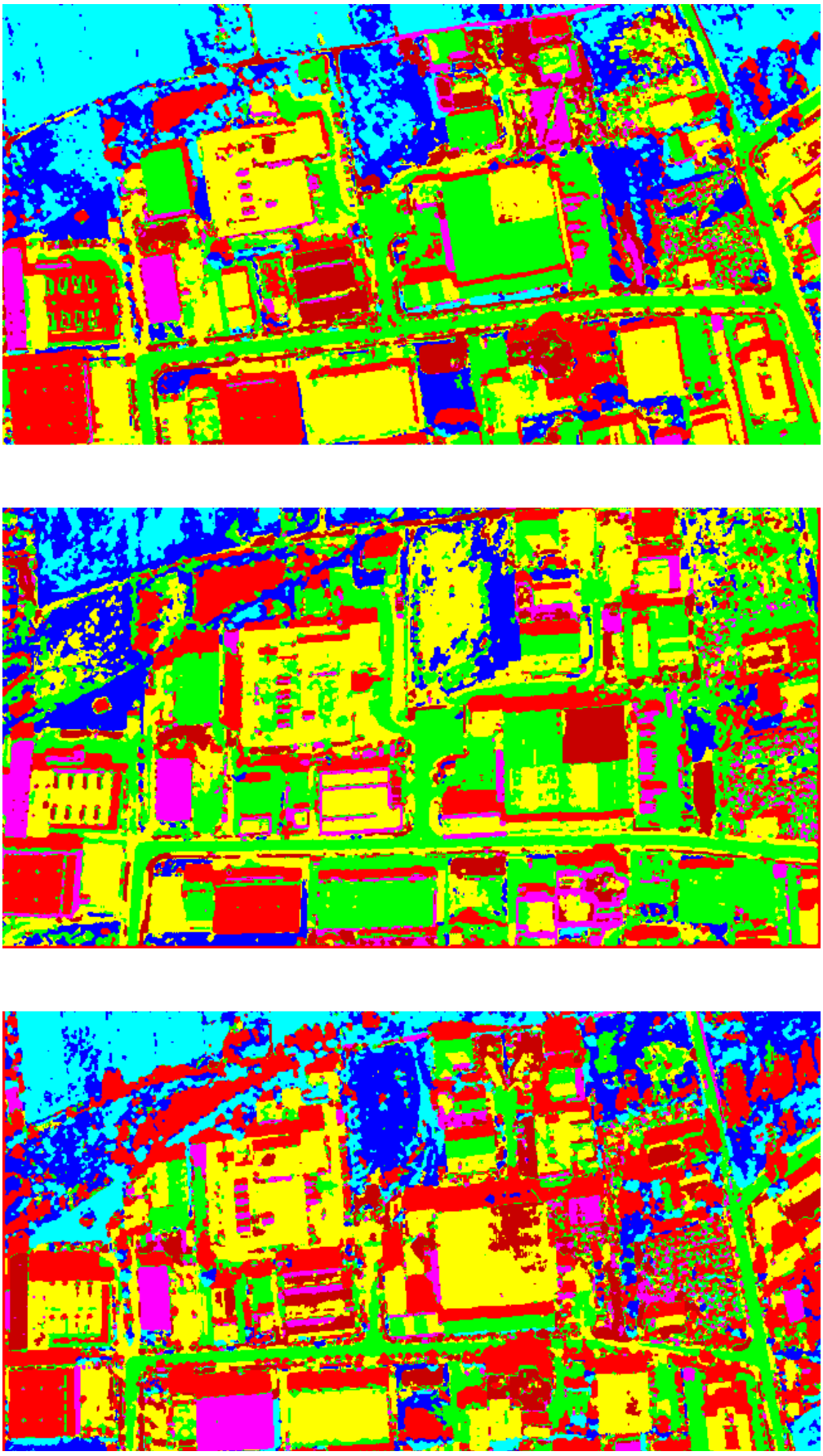


Abb. 42: Klassifikation mit 7 Klassen

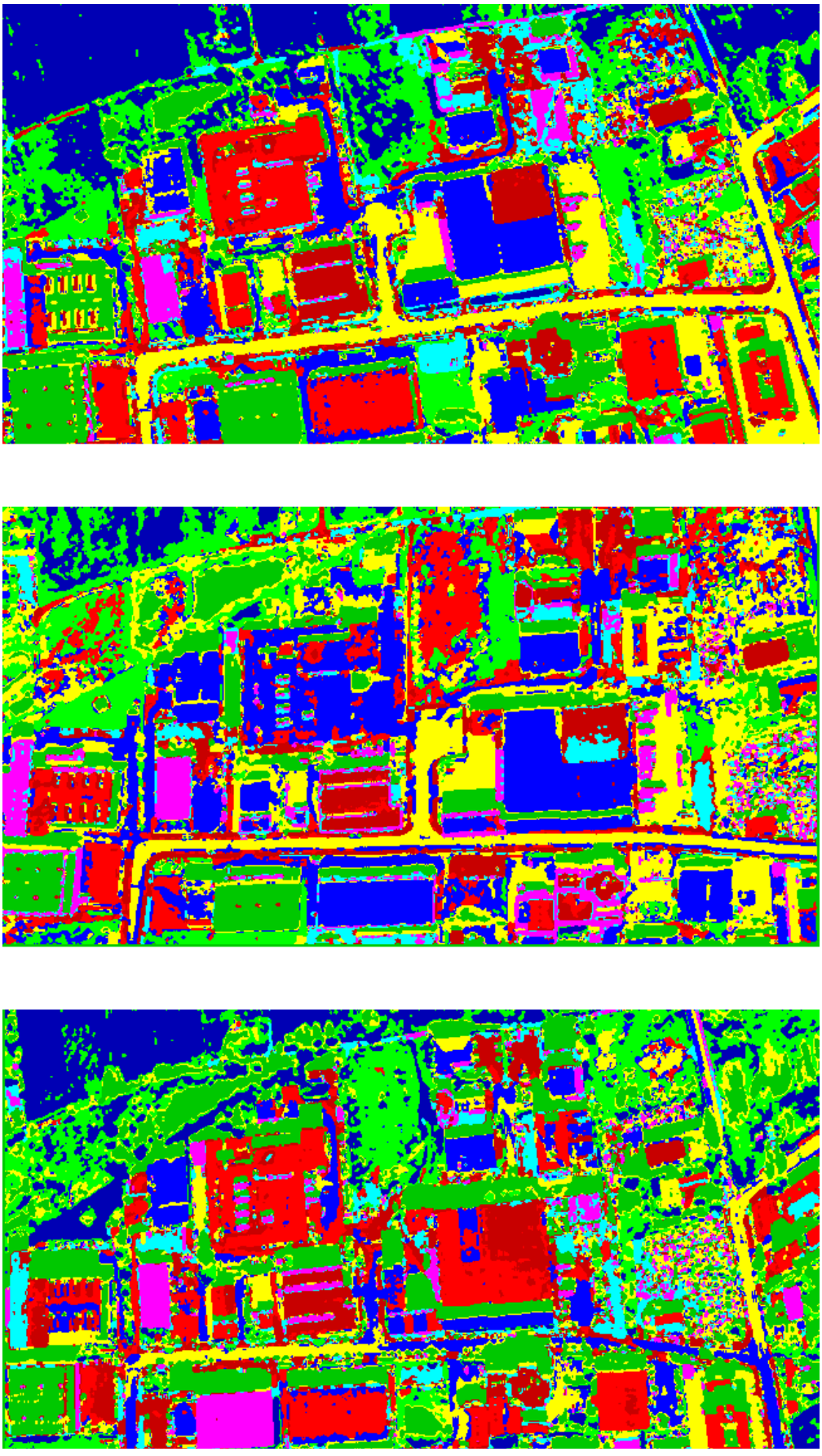


Abb. 43: Klassifikation mit 9 Klassen

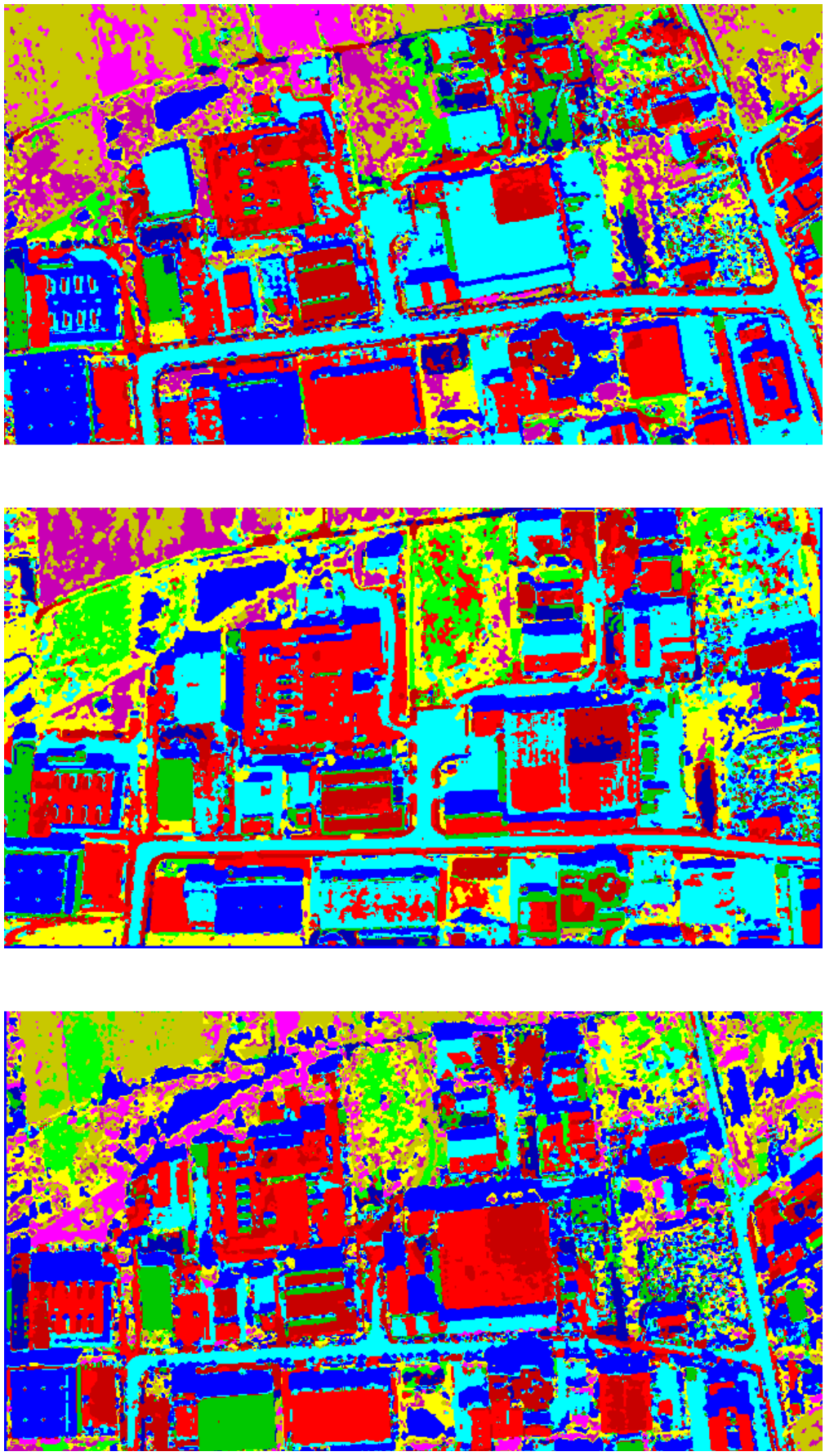


Abb. 44: Klassifikation mit 11 Klassen

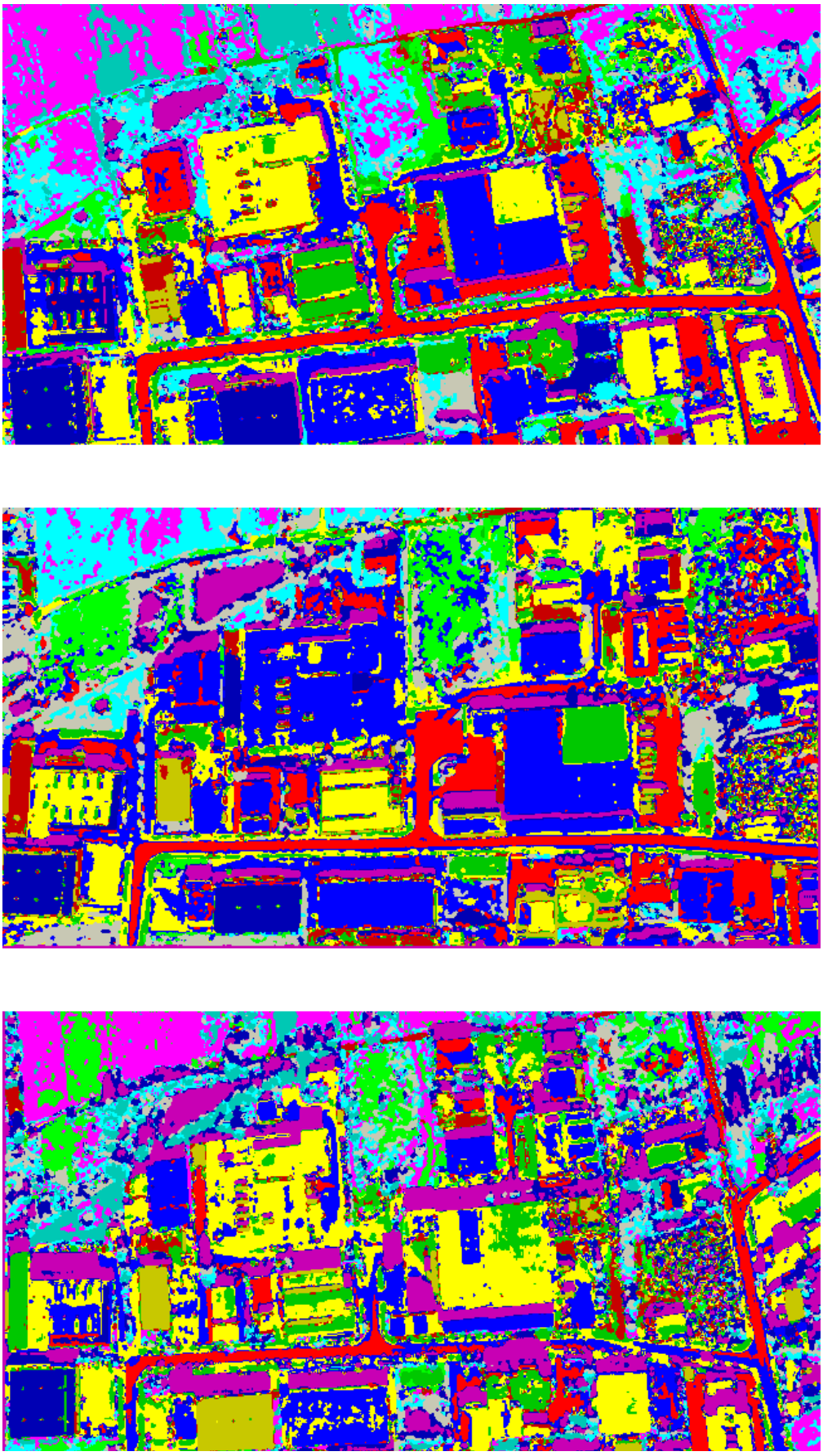


Abb. 45: Klassifikation mit 13 Klassen

Anzahl Klassen	1992												1994											
	Testpunkt												Testpunkt											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total	in %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total	in %
3	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	9/9	100	x	x	x	o	x	-	x	x	x	o	7/9	78
5	x	x	x	x	x	-	o	x	x	-	7/8	88	x	o	x	o	x	-	o	x	x	-	5/8	63
7	x	x	x	o	-	o	x	o	o	x	5/9	56	x	o	x	o	-	x	x	x	o	x	6/9	67
9	x	x	x	x	x	o	x	o	x	x	8/10	80	x	o	x	o	x	x	o	x	x	o	6/10	60
11	x	x	x	o	x	o	x	o	x	x	7/10	70	x	o	x	o	o	o	x	x	x	o	5/10	50
13	x	x	x	x	x	o	x	x	o	x	8/10	80	x	o	x	o	x	x	x	x	o	x	7/10	70

x = Übereinstimmung, o = keine Übereinstimmung.
„Total“ entspricht dem Quotienten aus der Anzahl übereinstimmender Klassifizierungen zur Gesamtzahl der bewertbaren Testpunkte. Mit „-“ gekennzeichnete Punkte konnten nicht bewertet werden, da die Klassifikation im Ursprungsbild (1991) nicht eindeutig war.

Tabelle 9: Multitemporaler Vergleich der Klassifikation

Eine Bewertung dieser Ergebnisse ist sehr schwer, da keine direkte Abhängigkeit der multitemporalen Übereinstimmung der Klassifikationen mit der Anzahl der Klassen erkennbar ist. Zu vermuten wäre, daß mit steigender Anzahl der Klassen auch die Fehlklassifizierungen zunehmen würden. Bei einer großen Anzahl von Klassen, deren Zentren im Merkmalsraum unweigerlich näher zusammenliegen, ist die Wahrscheinlichkeit größer, ein Objekt einer falschen Klasse zuzuordnen, dessen Reflektanz von seinem Klassenzentrum ein wenig entfernt ist, als bei einer kleinen Klassenanzahl (Extremfall: eine Klasse). Dieser Trend kann aber nur bei sehr niedriger Klassenzahl (3 und 5) erkannt werden.

Auch die Trefferquote, die immer größer oder gleich 50% beträgt, ist etwas irreführend, denn die Auswahl der 10 Testpunkte ist so erfolgt, daß eine visuelle Überprüfung leicht fällt (große Flächen, eindeutige Klassifikation). Es ist ebenso möglich, 10 Testpunkte zu finden, bei denen die Übereinstimmung wesentlich schlechter ausfällt. Eine automatisierte Auswertung ist wegen der fehlenden geometrischen Deckung der Bilder nicht möglich.

Natürlich sind auch die Anzahl der Testpunkte und die Auswahl der Szene Faktoren, die das Ergebnis entscheidend beeinflussen, so daß alles in allem dieser Vergleich der Klassifikationen nur als erster Versuch für den noch bevorstehenden Weg zur automatisierten Klassifikation und „change-detection“ zu bewerten ist.

7 Diskussion und Ausblick

Der Versuch, die aus den Daedalus-Messungen berechneten Reflektanzbilder auf ihre Richtigkeit mit Hilfe von Bodenreflektanzmessungen zu untersuchen, erscheint im ersten Moment als die einfachste und deutlichste Methode, die Meßergebnisse eines Sensors zu überprüfen.

Es stellte sich jedoch heraus, daß nicht nur der Weg zur Herstellung der Reflektanzbilder mit etlichen bekannten und unbekannten Fehlern behaftet ist, sondern auch die Bodenreflektanzmessungen mit dem IRIS-Spektroradiometer Fehler aufweisen, die z.T. noch einer Erklärung bedürfen. Die einzig bleibende Möglichkeit besteht in der Abschätzung, welcher der beiden Gesamtfehler der kleinere ist, um dann die Meßprozedur mit dem kleineren Fehler als Eichmaß für die Kalibrierung auszuwählen.

Diese Entscheidung fiel zugunsten des IRIS-Spektroradiometers aus, weil

- der Algorithmus zur Bestimmung der Daedalus-Reflektanzbilder sehr viel mehr, mit einzelnen Fehlern behaftete, sich fortpflanzende Schritte beinhaltet, als es beim IRIS der Fall ist,
- der Fehler, der durch die Berechnungen mit SENSAT–5 entsteht, nicht analytisch bestimmt werden kann,
- der Vergleich mit Messungen aus den Vorjahren 1991 und 1992 einer bessere Übereinstimmung mit den IRIS-Reflektanzwerten ergab, als mit denen des Daedalus von 1994,
- der Meßvorgang mit dem IRIS eine direkte Messung von Reflektanzwerten darstellt, und nicht, wie beim Daedalus, der Umweg über eine absolute Strahldichtekalibrierung gegangen wurde,
- bei der IRIS-Messung keine Winkelabhängigkeiten auftreten, da immer senkrecht zur Oberfläche gemessen wird. Beim Daedalus sind die gerätespezifischen Abhängigkeiten vom Scanwinkel zudem noch nicht eingehend untersucht worden.

Die Korrektur der Daedalus-Kalibrierung ließ sich auf eine lineare Transformation zurückführen, die für jeden Daedalus-Kanal aus einem Faktor und einem Summanden zusammensetzte. Aus der Tatsache, daß der Summand in allen Kanälen nahezu null war, läßt sich schließen, daß das Strahlungstransport-Simulationsprogramm SENSAT–5 das in den Daedalus-Sensor fallende Luftlicht (durch Streuung in der Atmosphäre) sehr gut berechnen kann.

Vor dem Hintergrund der o.a. Überlegungen stellt sich unweigerlich die Frage, ob zu jeder Messung mit dem Daedalus-Scanner begleitende Bodenreflektanzmessungen zu Kalibrierungszwecken durchgeführt werden sollten. Nach dem heutigen Stand der Arbeit ist dies eindeutig zu bejahen. Abgesehen aber davon, daß dies wahrscheinlich nur in den wenigsten Fällen möglich sein dürfte (Messungen in sehr unwegsamem Gelände, keine großen homogenen Flächen in natürlichem Gelände, weit vom Stützpunkt entfernt oder über sehr große Strecken), bleibt für die Zukunft natürlich auch das Bestreben, die Fehlerursache bei der Bestimmung der Reflektanzbilder genauer zu studieren und zu erkennen, um so die Möglichkeit zu schaffen, auch eine zuverlässigere Kalibrierung durchführen zu können.

Um diese Ergebnisse zu untermauern, sollte die Untersuchung dieser Arbeit noch einmal auf dieselbe Weise durchgeführt werden. Dazu können Daten aus Messungen verwendet werden, die im Juli 1995 durchgeführt wurden. Ergänzend hierzu wäre es noch denkbar, mit diesen, bis hierher gemachten Erfahrungen, weitere Versuche zu unternehmen, für die einige Anregungen folgen.

- Zur Kalibration mit den Bodenreflektanzmessungen sollten mehr Meßorte mit einer größeren Spektrenvielfalt herangezogen werden. Bei der Auswahl ist außerdem darauf zu achten, daß es sich um künstliche, kurz- und langzeitlich unveränderliche Oberflächen handelt.
- Die Überprüfung des IRIS-Spektroradiometers könnte mit Hilfe eines weiteren hochauflösenden Radiometer erfolgen, um gleichzeitig mit dem IRIS von denselben Oberflächen Messungen durchzuführen. Diesbezüglich sind schon Untersuchungen von der DLR begonnen worden.
- Es sollte versucht werden, auch für die, mit dem Zielflächenkanal des IRIS aufgenommen Spektren eine Kalibrierung auf absoluten Strahldichten vorzunehmen, um ermitteln zu können, wie groß der Fehler bei der SENSAT-Berechnung ist. Es könnte damit nicht nur ein Vergleich der Reflektanzwerte, sondern auch der Strahldichtemessungen durchgeführt werden.
- Denkbar wäre, großflächig (einige Quadratmeter) künstliche Oberflächen zu schaffen, deren Reflektanz bekannt ist. So könnten z.B. große Kunststoffplanen mit verschiedener Farbe ausgebreitet werden, die anschließend sowohl mit dem IRIS, als auch mit dem Daedalus gemessen werden können. Vielleicht wäre diese Methode sogar geeignet, den Daedalus-Scanner unmittelbar vor einer Messung (nach dem Start) mit solchen Referenzflächen zu kalibrieren, ohne Zuhilfenahme von Bodenmessungen [HAUSKNECHT 1995].

Der Weg zur eindeutigen Klärung der Ursache der fehlerhaften Daedalus-Kalibrierung ist noch weit. Trotzdem sollte dieser Weg im Hinblick auf die Möglichkeit der Kalibrierung eines Daedalus-Luftbildscanners ohne zusätzliche Bodenmessungen unbedingt beschritten werden, da nur so eine automatisierte multitemporale Bildauswertung möglich erscheint. Eine Verifikation von Abrüstung über fremdem Terrain aus der Luft sollte aus praktischen Gründen nach Möglichkeit **ohne** Bodenmessungen auskommen.

Anhang – Programmbeschreibungen

Die Programmiersprache IDL

IDL (Interactive Data Language) ist eine interaktive Programmiersprache, die über einen Interpreter leistungsfähige Werkzeuge zur Verarbeitung von größeren Datenmengen zur Verfügung stellt. So ist es u.a. möglich, auf einfache Weise Berechnungen mit großen Arrays (Datenfeldern wie Bilder, Matrizen etc.) durchzuführen. Außerdem lassen sich mit IDL komfortabel viele Datenstrukturen in Form von Graphen, Plots oder Bildern visualisieren. Daher bietet sich IDL zur Be– und Verarbeitung sowohl der IRIS– als auch der Daedalus–Meßdaten an.

daedalus2tiff

„daedalus2tiff“ wird zur Datenkonvertierung von dem Daedalus-eigenen Datenformat in das „TIFF“-Format umgewandelt. Der Aufruf dieses Programmes lautet (die Parameter in eckigen Klammer sind optional):

```
daedalus2tiff -i dfile [-o TIFFfile]
```

Dabei bedeuten die Parameter:

`dfile`	Daedalus-Original-Datei.
`TIFFfile`	Zu erzeugenden TIFF-Datei (Wird dieser Parameter nicht angegeben, so wird der Dateiname `dfile` mit der Endung „.tif“ erzeugt).

Die erzeugte TIFF-Datei enthält 12 einzelne Bilder (für jeden Kanal eines, der thermische Kanal ist doppelt vorhanden), in denen die Grauwerte der Scanneraufnahmen gespeichert sind.

SENSAT–5

Von der Oberfläche „SENSAT5.PRO“ des Programmes SENSAT-5, die unter IDL lauffähig ist, wurde eine Kopie namens „DAEDALUS.PRO“ so abgeändert, daß einige Eingaben bei der Erzeugung eines Parametersatzes automatisch mit Werten belegt werden, die für den Scanner Daedalus AADS 1268 (für die Messung 1994) zutreffen. Der grobe Programmablauf zur Berechnung der nötigen ATM-Dateien ist:

1. Auswahl des Datei-Namens des Parametersatzes (case).
2. Start der Einrichtung eines Parametersatzes mit „SET UP NEW CASE“ (Abb. 47).
3. Auswahl der Apparatefunktion des betroffenen Daedalus-Kanals.
4. Angabe der Datei mit dem Standard-Radiosondenprofil (Tabelle 10).
5. Eingabe der Atmosphären- und Versuchsparameter (Abb. 46 und Tabelle 6).
6. Über „MODIFY EXISTING CASE“ (Abb. 47) und „save as (new file)“ (Abb. 48) alle weiteren Parametersätze für die anderen Daedalus-Kanäle erzeugen.
7. Start der Berechnungen mit „RUN EXISTING CASE“ (Abb. 47) für jeden Kanal getrennt.

Wichtig ist, nach Beendigung von Schritt 5, die Berechnung (MODTRAN, SENSAT–5) für diesen neu erfaßten Parametersatz zu starten. Dieser Vorgang kann dann sofort abgebrochen werden. Erfolgt dieser Start nicht, so werden die eingegebenen Parameter nicht gespeichert.

Die so erzeugten 10 ATM-Dateien tragen den selben Dateinamen wie der zugehörige Parametersatz, nur mit der Endung „.atm“.

19 0 0 NUERNBERG, 18. OKT. 1994 (DAEDALUS) VIS = 30 KM					
0.00	0.0	0.0	0.0	0.	0.22222222222222
0.10	0.0	0.0	0.0	0.	0.22222222222222
0.20	0.0	0.0	0.0	0.	0.22222222222222
0.30	0.0	0.0	0.0	0.	0.22222222222222
1.00	0.0	0.0	0.0	0.	0.22222222222222
. .	. .	. .	. .	. .	. .
50.00	0.0	0.0	0.0	0.	0.22222222222222
70.00	0.0	0.0	0.0	0.	0.22222222222222

Tabelle 10: Standard-Radiosondenprofil-Datei (standard.prf)

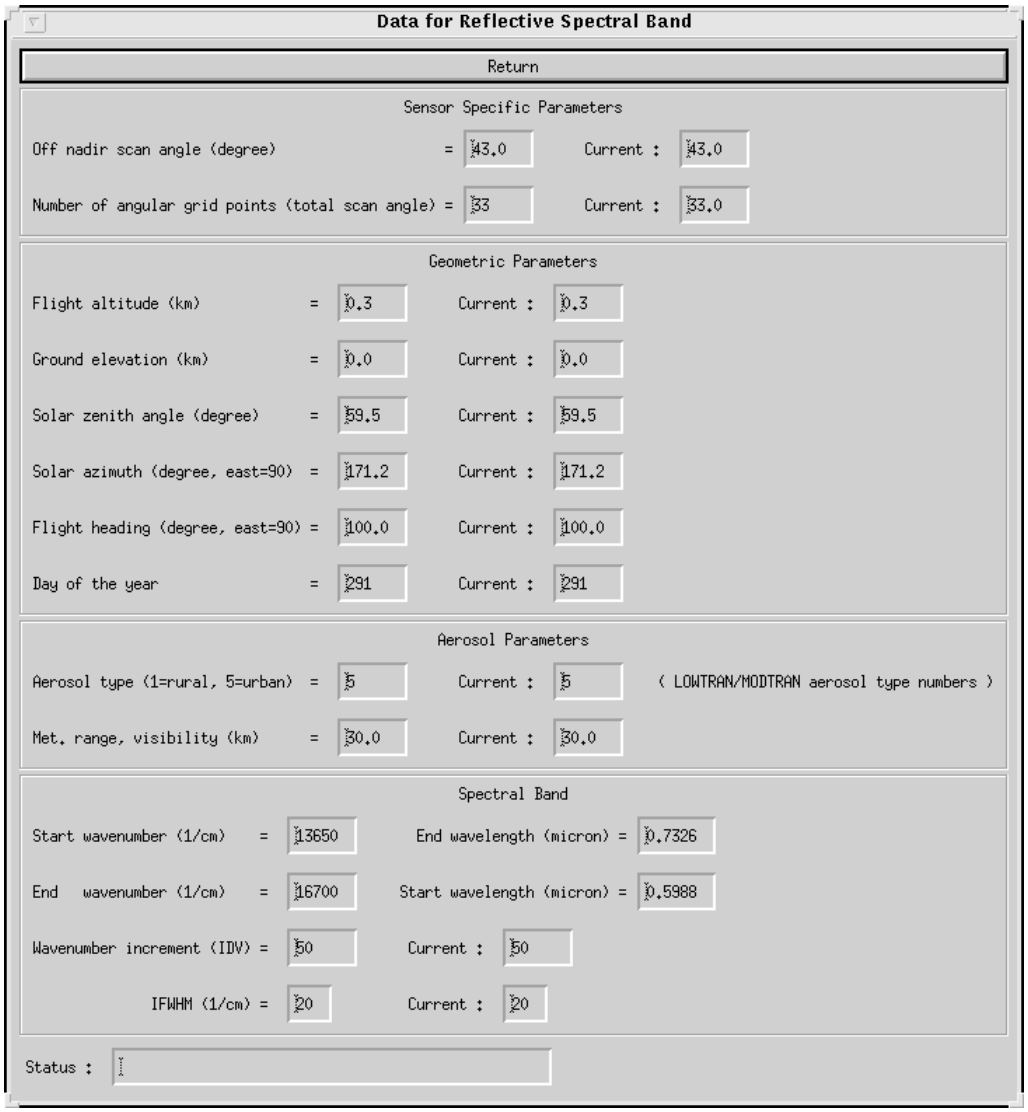


Abb. 46: Eingabemaske eines neuen Parametersatzes in SENSAT5

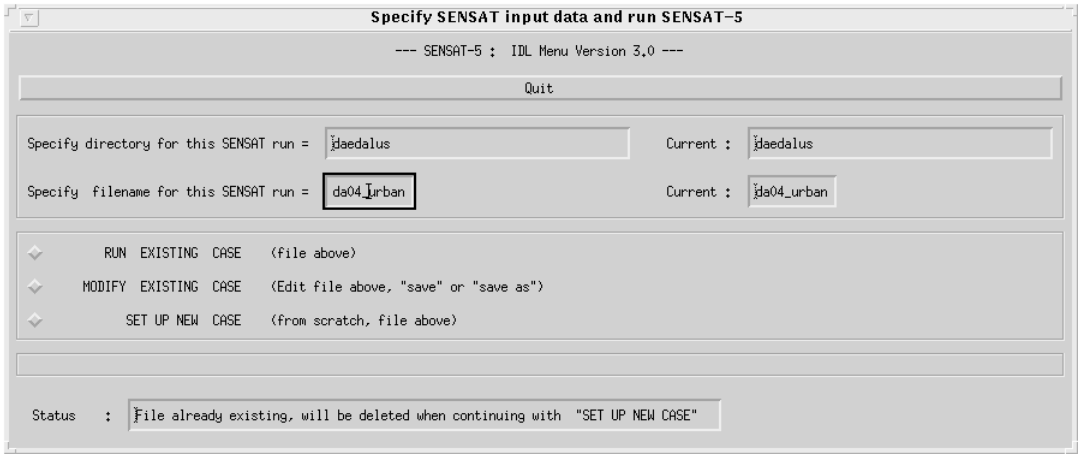


Abb. 47: Graphische Benutzeroberfläche von SENSAT5

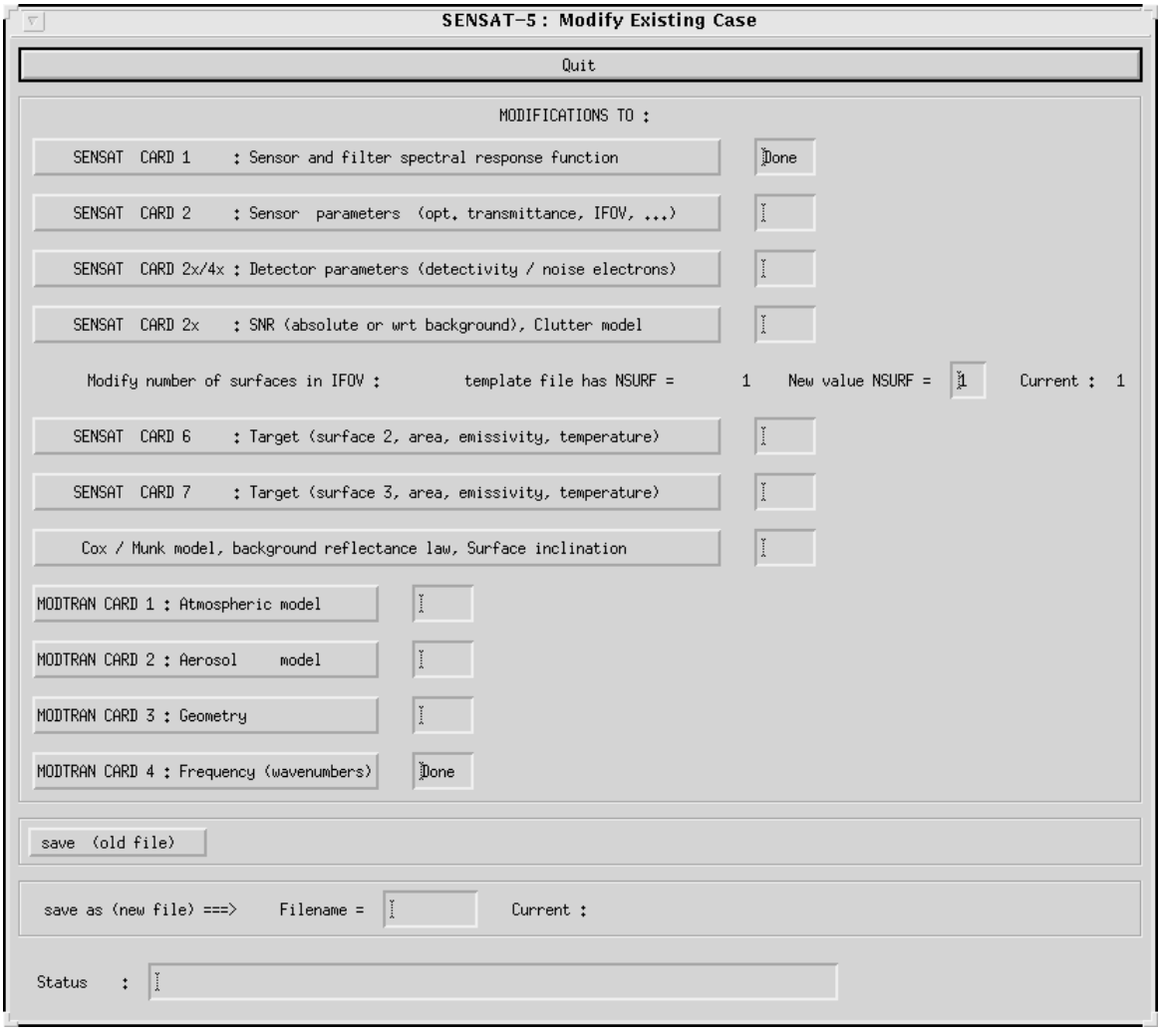


Abb. 48: Maske zum Ändern eines Parametersatzes

ref_image

Das Programm „ref_image“ verwendet die Ergebnisse des Programmes SENSAT–5, daedalus2tiff und evtl. auch Korrekturfaktoren, die sich durch die Kalibrierung mit den Bodenmessungen ergeben (siehe 5.1.3). Der Aufruf erfolgt mit (die Parameter in eckigen Klammern sind optional):

```
ref_image -i itfile -o otfile -a atmfile [-r] [-c cfile]
```

Dabei bedeuten die Parameter:

`itfile`	Daedalus-Grauwert-Eingabedatei im TIFF-Format.
`otfile`	Reflektanzwert-Ausgabedatei im TIFF-Format. Der Dateiname erhält zusätzlich automatisch die Endung „-cor“.
`atmfile`	ATM-Dateien. Die Dateien für die 10 Daedalus-Kanäle müssen alle einen Dateinamen besitzen, der sich nur in der letzten Ziffer unterscheidet, z.B. `da1994.atm0, da1994.atm1, ..., da1994.atm9`. Als Dateiname würde hier dann `da1994.atm angegeben.`
`cfile`	Diese Datei muß (wenn angegeben) die Korrekturfaktoren zur Kalibrierungskorrektur (siehe z.B. Tabelle 8) beinhalten

Die Option `-r` (reverse) muß angegeben werden, wenn sich die Flugrichtung des zu berechnenden Bildes um 180° von der Richtung unterscheidet, die bei der Berechnung der ATM-Dateien im SENSAT–5-Parametersatz angegeben wurde.

Die erzeugte TIFF-Datei enthält 12 einzelne Bilder (für jeden Kanal eines), in denen die berechneten Reflektanzwerte gespeichert sind.

adjacen

Der Berechnung des Überstrahlungseffektes (siehe 4.2.5) und die damit verbundenen notwendige Korrekturen der Reflektanzbilder wird mit dem folgenden Programmaufruf durchgeführt :

```
adjacen -i itfile -o otfile -a atmfile
```

Dabei bedeuten die Parameter:

`itfile`	Reflektanzwert-Eingabedatei im TIFF-Format.
`otfile`	Reflektanzwert-Ausgabedatei im TIFF-Format. Der Dateiname erhält zusätzlich automatisch die Endung „-adj“.
`atmfile`	ATM-Dateien. Beschreibung siehe Programm `ref_image`.

IDL–Hilfsroutinen

Es seien hier noch einige kurze Hilfsprogramme aufgeführt, die Routinearbeiten zu erledigen hatten (alle mit Dateiendung „.PRO“):

- Für die Abbildungen:
  ALLPLOTS PLOT919294 VERGL919294 DAED_IRIS
  PLOTCALIB SPLOT SPECAVE
- Für SENSAT5:
  MAKEATM

- IRIS-Berechungen:
  TODAED NURDAED MAKE_A
  GENERATE_ALLMP
- Daedalus-Berechnungen:
  AUTO_REF AUTO_OVERVIEW CPZ (clippolyzoom)

Danksagung

Prof. Dr. H. Spitzer und Prof. Dr. J. Bienlein ermöglichten diese Arbeit. Ich danke ihnen dafür und für viele wertvolle Anregungen und konstruktive Kritik.

Für die laufende Betreuung danke ich besonders Herrn Dr. Martin Kollewe und Herrn Rafael Wiemker, die durch anregende Diskussionen und hilfreiche Unterstützung zur Erstellung dieser Arbeit wesentlich beigetragen haben.

Für die Durchführung der Messungen und für die Erläuterungen der Bedienung und Funktionsweise der Meßgeräte, sowie für die ausführlichen Informationen zur Auswertung der Meßwerte möchte ich mich bei Herrn P. Hausknecht bedanken.

Dank auch an Herrn V. Amann für diverse Auskünfte über die Flugzeugscanneraufnahmen.

Schließlich bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern der Gruppe KOGS der Informatik der Universität Hamburg für ihre Unterstützung in allen Computerfragen.

Literaturverzeichnis

[AMANN 1994], Volker, DLR Oberpfaffenhofen
Private Mitteilung

[BAKAN 1988], Stephan & Graßl, Hartmut
„Strahlungsübertragung in der Atmosphäre“, Skript zur Vorlesung WS 1988/89, Universität Hamburg

[CENSIS 1995]
Zweijahresbericht 1993/1994 der Arbeitsgruppe Naturwissenschaft und Internationale Sicherheit in der Universität Hamburg. CENSIS-Report-14-95

[DAEDALUS 1990], Enterprises, Inc.
„Technical proposal DS-1268/DS-1861 packages“, 1990, Michigan

[GRAßL 1989], Hartmut & Schlüssel, Peter
„Einführung in die Meteorologie I“, Skript zur Vorlesung SS 1989, Universität Hamburg

[HAUSKNECHT 1994], Peter
„Reflexionsspektroskopische Laboruntersuchungen an Mineralien und Gesteinen“, Diplomarbeit, DLR, 1994, Ludwig-Maximilians-Universität München

[HAUSKNECHT 1995], Peter, DLR Oberpfaffenhofen
Private Mitteilung

[HEPP 1994], Thomas
„Erzeugung multispektraler Reflektanzbilder zur automatisierten Bildauswertung“, Diplomarbeit, CENSIS-REPORT-10-94, 1994, Universität Hamburg

[IRIS], Mark IV
Systembeschreibung des Spektroradiometers IRIS - Mark IV
Fa. GER, USA

[KOLLEWE 1993], Martin
„Fernerkundung von Wolken mit der Sauerstoff Absorptionsbande im nahen Infrarot“
Universität Hamburg 1993

[LILJEQUIST 1984], Gösta H. & Cehak, Konrad
„Allgemeine Meteorologie“, 3. Auflage 1984, S. 8–27, S. 47–48

[MCCLATCHEY 1972], R. A., W. Fenn, J. E. A. Selby, F. E. Volz, J. S. Garing
„Optical Properties of the Atmosphere“, AFCRL Envirn. Papers 411

[POHL], Martin und Eriksdotta, Holger
„Die wunderbare Welt der Graphikformate“, Wolframs Fachverlag 1991

[RICHTER 1994], Rudolf
„Model SENSAT–5 Sensor-Atmosphere-Target“, DLR – IB 552-01/94, 1994, DLR-Institute for Optoelectronics, Weßling/München

[STRATHMANN 1990], F. W.
„Taschenbuch zur Fernerkundung“, Wichmann-Verlag, Karlsruhe 1990

[WERNER 1990], K. & Lehmann, F.
„Development and testing of new techniques for mineral exploration based on remote sensing image processing methods and multivariate analysis“, 1990, DLR-Institute for Optoelectronics, Weßling/München

Erklärung

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen angefertigt habe.

_____

(Thomas Kollewe)