Zusammenfassung

Aufbauend auf originalen Bilddaten des flugzeuggestützten 11-Kanal Multispektralscanners AADS 1268 der Firma Daedalus und dessen absoluter Kalibration wurden Reflektanzbilder erzeugt.

Die Reflektanzen sind für Oberflächen charakteristische Eigenschaften und haben gegenüber den Originaldaten den Vorteil, daß sie eine physikalische Größe darstellen, die im Idealfall unabhängig von den Sensoreigenschaften, den Atmosphärenbedingungen, der Beleuchtung und der Aufnahmegeometrie sind. Erst diese Normierung ermöglicht es, die im Rahmen der Fernerkundung aufgenommenen Bilddaten physikalisch sinnvoll auszuwerten und zu vergleichen.

Für die grundlegenden Modellrechnungen wurde das Programmpaket SENSAT-4, welches das Modell LOWTRAN-7 zur Atmosphärenkorrektur beinhaltet, eingesetzt. Darauf aufbauend wurde ein Verfahren zur Erzeugung von Reflektanzbildern implementiert.

Die so gewonnenen Reflektanzen stimmen innerhalb der Fehler mit denen aus anderen Messungen überein. Dadurch ist es ohne statistische Anpassungen möglich, multitemporale Aufnahmen quantitativ zu vergleichen. Am Beispiel des Maximum-Likelihood Verfahrens wird gezeigt, daß mit einmalig bestimmten Objektklassen eine Klassifikation auf multitemporalen Reflektanzbildern sehr gute Ergebnisse liefert. Die größten Fehler der Reflektanzen und somit auch der Klassifikation kommen durch die Genauigkeit der Sensorkalibration und durch die Modellannahme, daß alle Oberflächen horizontal sind und die Strahlung isotrop reflektieren, zustande.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 7

Tabellenverzeichnis 9

1 Einleitung 11

2 Die Strahlung auf dem Weg von der Sonne zum Sensor 13

2.1 Radiometrische Größen 13
2.2 Die Strahlungsemission der Sonne 14
2.3 Strahlungsausbreitung in der Atmosphäre 15
2.4 Objekteigenschaften 22
2.5 Strahlung am Sensor 25

3 Das Experiment 27

3.1 Die Überfliegungen 27
3.2 Der Sensor 28
3.3 Kalibration des Scanners 31
3.4 Konvertierungen der Originaldaten 32
3.5 Bildverarbeitungsprogramme 33

4 Erzeugung von Reflektanzbildern 35

4.1 Grundlagen 35
4.2 Das Modell SENSAT-4 35
4.3 Programmablauf von LOWTRAN und SENSAT-4 38
4.4 Das Programm zur Erzeugung von Reflektanzbildern 39
4.5 Der Überstrahlungseffekt 41

5 Anwendung der Atmosphärenkorrektur 43

5.1 Grundlagen der quantitativen Analyse multispektraler Daten 43
5.2 Eingabeparameter 44
5.3 Die Reflektanzbilder 53
5.4 Multitemporaler Vergleich 54
5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse 59

6 Multispektrale Klassifikation auf Reflektanzbildern 61

6.1 Grundlagen der multispektralen Klassifikation 61
6.2 Anwendung der Maximum Likelihood Klassifikation 64
6.3 Zusammenfassung 70

7 Ausblick 71

8 Anhang 73

8.1 Beschreibung der C-Programme 73
8.2 Format von *.modpar1 77
8.3 Der Bhattacharyya-Abstand 77

Literaturverzeichnis 79

Abbildungsverzeichnis

Abb.1 Strahlung von der Sonne zum Sensor 13

Abb.2 Konzept der spektralen Strahldichte L_λ 14

Abb.3 Solare Bestrahlungsstärke (Irradiance) außerhalb der Atmosphäre und in Meereshöhe 15

Abb.4 Spektrale Transmission der Atmosphäre im Bereich von 0,2 - 20 µm 15

Abb.5 Aufbau der Atmosphäre 17

Abb.6 CO_2-Konzentration in Abhängigkeit der Jahreszeit für 1950 - 2000 18

Abb.7 Schematische Darstellung der Vibrationsmodi von N_2, O_2, CO, CO_2, N_2O, H_2O, O_3 20

Abb.8 Spiegelnde, diffuse (lambert'sche) und gemischte Reflexion an einer Oberfläche 23

Abb.9 BRDF (γ [sr^{-1}]) für Getreide 24

Abb.10 Reflektanzspektren von Sand-, Gras- , Wasser und Erd-Proben 25

Abb.11 Lageplan der Überfliegungen 27

Abb.12 Aufnahmegeometrie und Datenformatierung 28

Abb.13 Schematischer Aufbau des Scan-Kopfs und Spektrometers des Daedalus Scanners 29

Abb.14 Spektralbereiche des Daedalus AADS 1268 30

Abb.15 Im Labor gemessene Apparatefunktion des Kanals 2 des Daedalus AADS 1268 37

Abb.16 Programmablauf von LOWTRAN-7 und SENSAT-4 39

Abb.17 Schematische Darstellung des Programmablaufs von ref_image zur Erzeugung eines Reflektanzbildes 40

Abb.18 Reflektanzspektren eines Hausdaches (Dach0 in Abb.39) bei „300 m und 1800 m, 1991" unter Variation des Parameters „Sichtweite" 45

Abb.19 Reflektanzspektren einer Straße (Straße3 in Abb.39) bei „300m und 1800m, 1991" unter Variation des Parameters „Sichtweite" 46

Abb.20 Reflektanzspektren des Sees (Abb.39) bei „300m und 1800m, 1991" unter Variation des Parameters „Sichtweite" 46

Abb.21 Reflektanzspektren „Dach0" bei „300 m und 1800 m, 1992" unter Variation des Parameters „Sichtweite" 48

Abb.22 Reflektanzspektren „Vegetation0" bei „300 m und 1800 m, 1992" unter Variation des Parameters „Sichtweite" 49

Abb.23 Reflektanzspektren „See" bei „300m und 1800m, 1992" unter Variation des Parameters „Sichtweite" 50

Abb.24 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte:„Dach0, 1991" 51

Abb.25 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte: „Hof0, 1991" 51

Abb.26 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte: „Strasse3, 1991" 52

Abb.27 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte: „See, 1991" 52

Abb.28 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte: „Dach0, 1992" 53

Abb.29 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte: „See, 1992" 53

Abb.30 Originale Grauwerte „Dach0, 1991 und 1992" 54

Abb.31 Multitemporaler Vergleich von „Dach0" 55

Abb.32 Multitemporaler Vergleich von „Hof0" 55

Abb.33 Multitemporaler Vergleich von „Hof1" 56

Abb.34 Multitemporaler Vergleich von „Vorfeld1" 56

Abb.35 Multitemporaler Vergleich von „Dach2" 57

Abb.36 Multitemporaler Vergleich von „Dach4" 57

Abb.37 Darstellung von Vegetation, Wasser und Asphalt im zweidimensionalen Merkmalsraum für die Kanäle 4 und 7 des Daedalus AADS 1268 61
Abb.38 Eindimensionale Normalverteilung für drei verschiedene Spektralklassen ω_i 63
Abb.39 Trainingsgebiete „Industriegebiet 1991“ 65
Abb.40 Trainingsgebiete „Flughafen 1991“ 66
Abb.41 Reflektanzspektren der Objektklassen „1991“ 67

Bild 1 Farbkompositbild aus den originalen Bilddaten i
Bild 2 Farbkompositbild aus dem Reflektanzbild i
Bild 3 IR-Farbkompositbild aus dem Reflektanzbild „1991“ ii
Bild 4 IR-Farbkompositbild aus dem Reflektanzbild „1992“ iii
Bild 5 Farbzuordnung der Objektklassen iv
Bild 6 Klassifikationsergebnis der Szene „Industriegebiet 1991, 300 m“ iv
Bild 7 Klassifikationsergebnis der Szene „Flughafen 1991, 300m“. v
Bild 8 Klassifikationsergebnis der Szene „Industriegebiet 1992, 300 m“ auf den originalen Bilddaten v
Bild 9 Klassifikationsergebnis der Szene „Industriegebiet 1992, 300m“ vi
Bild 10 Klassifikationsergebnis der Szene „Flughafen 1992, 300 m“ vii
Bild 11 Klassifikationsergebnis der Szene „Flughafen 1991, 1800 m“ vii
Bild 12 Klassifikationsergebnis der Szene „Flughafen 1992, 1800 m“ vii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Gase mit konstantem Anteil in einer trockenen Atmosphäre [Thomas & Duncan 1993]1 8
Tabelle 2 Gase mit variierendem Anteil in der Atmosphäre [Thomas & Duncan 1993] 18
Tabelle 3 Rotationskonstante B für einige Moleküle 21
Tabelle 4 Spektrale Auflösung und Detektormaterial 30
Tabelle 5 Kalibrationswerte des Daedalus AADS 1268 32
Tabelle 6 Standardatmosphären und Aerosolmodelle 36
Tabelle 7 Auszug aus einem SENSAT-4-Ergebnis („atm-Datei“) 38
Tabelle 8 Sonnenstand und Aufnahmegeometrie 44
Tabelle 9 Reflektanzen des „Dach0, 1991“ 47
Tabelle 10 Vergleich der Reflektanzen für verschiedene Sichtweiten „1991“ 47
Tabelle 11 Vergleich der Reflektanzen für verschiedene Sichtweiten „1992“ 50
Tabelle 12 Spektrale Daten des Objekts „Dach0“ 58
Tabelle 13 Spektrale Daten des Objekts „Hof1“ 58
Tabelle 14 Spektrale Daten des Objekts „Hof0“ 58
Tabelle 15 Vergleich der Reflektanzen zwischen „1991“ und „1992“ 59
Tabelle 16 Bhattacharyya-Abstände zwischen den Objektklassen 68

1 Einleitung

Diese Arbeit wurde innerhalb des Projektes „Verifikation von konventioneller Abrüstung in Europa durch Fernsensoren“ durchgeführt.

Das Projekt besteht aus den beiden Bereichen „Physikalische Grundlagen der Fernerkundung“ und „Konzeption eines Systems zur wissensbasierten Bildauswertung“.

Das zweite Thema wird von der Gruppe OSCAR[1] [Drewniok et al. 1993] des Fachbereichs Informatik bearbeitet. Ziel der Bildauswertung ist, Änderungen in den untersuchten Szenen gegenüber „Referenzen“ (z.B. aus Landkarten oder bereits vorhandenen Bilddaten) zu erkennen (Change Detection) und zu interpretieren. Dabei sollen sich die zugrundeliegenden Beobachtungen hauptsächlich auf Infrastrukturelemente (z.B. Gebäude, Straßen, Eisenbahntrassen und Flughäfen) beziehen.

Bei der Bildauswertung sollen zeitliche Veränderungen in den Beobachtungsgebieten festgestellt werden. Anhand multispektraler Bilder läßt sich dies erkennen, falls sich Objekte und somit auch deren Reflexionseigenschaften zeitlich geändert haben.

Die Reflexionseigenschaften sind allerdings nicht direkt anhand der originalen multitemporalen Bilddaten zu vergleichen, da der Aufnahmenprozeß eines Multispektralsensors von vielen unterschiedlichen Faktoren beeinflußt wird. Dies sind im wesentlichen Atmosphärenbedingungen, Beleuchtungsverhältnisse (Sonnenstand), Aufnahmegeometrie und Sensoreigenschaften. Um dennoch solche Bilddaten miteinander vergleichen zu können, gibt es im wesentlichen zwei Ansätze:

1. Bildbasierte Szene - Szene Anpassungen durch (meist) lineare Transformationen (dazu werden meist Flächen betrachtet, deren Reflexionseigenschaften sich zwischen den Aufnahmen möglichst nicht geändert haben).
2. Normierung der Bilddaten durch Algorithmen zur Atmosphärenkorrektur.

Beispiele für den ersten Ansatz sind u.a. in [Schott et al. 1988] und [Hall et al. 1991] zu finden. Diese Methoden haben den Vorteil, daß Sensoreigenschaften, Aufnahmegeometrie (zumindest bei Satellitenaufnahmen) usw. nicht bekannt sein müssen, da sie lediglich die Bilddaten aneinander angleichen. Der Nachteil dieser Methoden ist, daß sie nur von Szene zu Szene funktionieren und keine physikalischen Größen liefern.

Der zweite Ansatz bezieht sich auf die physikalischen Vorgänge, die die Aufnahme beeinflussen. Ziel dieser Ansätze ist die Bestimmung der Reflexionsgrade (kurz: der Reflektanzen) der betrachteten Flächen (z.B. [de Haan et al. 1991], [Holm et al. 1989], [Isaacs & Vogelmann 1988] und [Moran et al. 1992]). Die dazu benötigten Modelle basieren meist auf der vereinfachenden Annahme, daß die Flächen ideal diffus (isotrop) reflektieren (Lambert-Reflektor). Für einen Lambert-Reflektor ist die Reflektanz durch

---

1. OSCAR: *Open Skies for Conventional Arms Reduction*

Prof. Dr. Leonie Dreschler-Fischer, Christian Drewniok, Harald Lange, Carsten Schröder
Fachbereich Informatik der Universität Hamburg
Arbeitsgruppe Kognitive Systeme
Vogt-Kölln-Straße 30
22527 Hamburg

das Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Bestrahlungsstärke direkt an der Fläche gegeben. Die Reflektanz ist somit eine physikalische Größe, die für Lambert-Reflektoren nicht von den Aufnahmebedingungen abhängt.

Zur Bestimmung der Reflektanzen ist eine Berechnung verschiedener radiometrischer Größen (u.a. die einfallende und reflektierte Strahldichte) nötig. Diese können durch Algorithmen zur Atmosphärenkorrektur bestimmt werden.

In dieser Arbeit wurde das Modell SENSAT-4 („Sensor - Atmosphäre - Target“) der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) [Richter 1992-2] eingesetzt. Es wurde für den optischen Spektralbereich entwickelt und beinhaltet auch die Modellierung des Sensors und der Erdoberfläche. Für die benötigten Berechnungen der Strahlausbreitung in der Atmosphäre wurde das Modell LOWTRAN-7 [ONTAR 1991] integriert.

Mit diesem Modell und zusätzlichen eigenen Ergänzungen konnten dann aus den originalen Bilddaten des Daedalus AADS 1268 Scanners[1] Reflektanzbilder erzeugt und der Gruppe OSCAR erstmals zur Verfügung gestellt werden.

Im folgendem wird kurz auf den Inhalt der Diplomarbeit eingegangen:

Das zweite Kapitel beinhaltet physikalische Grundlagen des Strahlungsverlaufs von der Sonne über das Target zum Sensor. Die Schwerpunkte liegen dabei auf Eigenschaften der Atmosphäre, der physikalischen Eigenschaften der Strahlausbreitung und der spektralen Reflexionseigenschaften von Objekten.

Zu Beginn des dritten Kapitel werden die von der DLR durchgeführten Überflüge beschrieben. Danach wird recht ausführlich auf die Funktionsweise und Eigenschaften des eingesetzten Scanners eingegangen. Daran anschließend wird die Konvertierung des originalen Datenformats in ein weitverbreitetes Bildformat beschrieben.

Aufbauend auf diesen beiden Kapiteln werden dann im vierten Kapitel zuerst die theoretischen Grundlagen zur Erzeugung von Reflektanzbildern und dann die praktische Umsetzung beschrieben. Dabei wird auch - soweit dies für diese Arbeit nötig ist - das eingesetzte Gesamtmodell SENSAT-4 beschrieben. Ebenso werden die zusätzlich geschriebenen Programme erklärt.

Thema des fünften Kapitels ist dann die Erzeugung und Auswertung von Reflektanzbildern aus den vorhandenen Originaldaten. Da sich die Auswertungen dabei häufig auf den Vergleich multispektraler Daten beziehen, werden zu Beginn des Kapitels die dazu benötigten Grundlagen einer quantitativen Analyse eingeführt. Anschließend wird gezeigt, wie anhand der Reflektanzbilder Atmosphärenparameter und Kalibrationswerte des Sensors qualitativ überprüft wurden. Den Abschluß bildet ein multitemporaler Vergleich der Reflektanzen einiger Objekte und eine Diskussion über die erzielten Ergebnisse.

Im sechsten Kapitel werden die Möglichkeiten einer multitemporalen Klassifikation auf Reflektanzbildern gezeigt. Zur Klassifikation wurde das gebräuchliche Maximum Likelihood Verfahren , das am Anfang des Kapitels beschrieben wird, eingesetzt.

---

1. Die Gruppe Oscar hat durch die DLR Überfliegungen mit dem Daedalus AADS 1268 im Bereich des Nürnberger Flughafens im August 1991 und April 1992 in 300m, 900m und 1800m Flughöhe durchführen lassen.

2 Die Strahlung auf dem Weg von der Sonne zum Sensor

Für eine qualitative und im besonderen quantitative Beurteilung einer Luftbildaufnahme ist es notwendig, den Verlauf der Strahlung von der Sonne über die Reflexion am Boden bis hin zum Sensor genauer zu untersuchen. Die unterschiedlichen Strahlengänge sind in Abb.1 schematisch dargestellt.

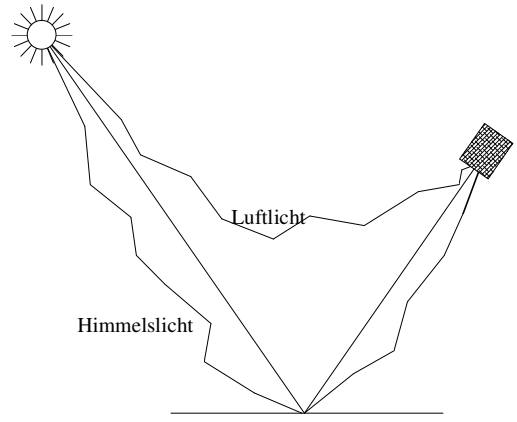


Abb.1 Strahlung von der Sonne zum Sensor

Von der Sonne emittierte Strahlung gelangt durch die Atmosphäre der Erde auf das Target. Dabei kann zwischen einem direkten und diffusem Anteil unterschieden werden. Der diffuse Anteil (Himmelslicht) entsteht hauptsächlich durch Mehrfachstreuung in der Atmosphäre. Das Target reflektiert, entsprechend seiner Eigenschaften, einen Teil der Strahlung in Richtung des Sensors. Diese Strahlung hat ebenfalls einen direkten und diffusen Anteil. Den Sensor erreicht zusätzlich auch noch Strahlung, die nur innerhalb der Atmosphäre gestreut wird (Luftlicht). In den folgenden Abschnitten werden die physikalischen Grundlagen, die diese Effekte bewirken, genauer untersucht.

2.1 Radiometrische Größen

Die *spektrale Strahldichte* $L_\lambda \left[W/cm^2 sr\,\mu m \right]$ (Radiance) (Abb.2) an einem Punkt der Fläche dA in Richtung eines Strahls durch diesen Punkt ist definiert als der *differentielle Strahlungsfluß* $d\Phi$ [W] innerhalb eines Wellenlängenintervalls λ und $\lambda+d\lambda$ [µm] pro gegebenem projiziertem Flächenelement $dA\,cos\,\theta$ [cm^2] und pro gegebenem Raumwinkel $d\Omega$ [sr].

$$L_\lambda = \frac{d\Phi}{d\Omega\, dA\, cos\,\theta\, d\lambda}. \qquad \text{(G. 1)}$$

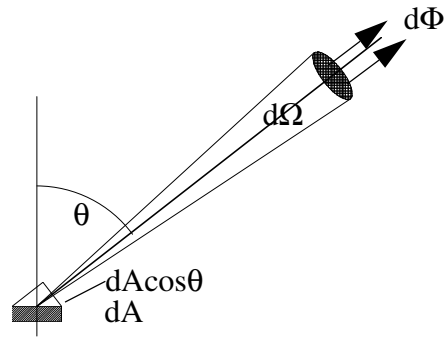


Abb.2 Konzept der spektralen Strahldichte L_λ

Die *spektrale Bestrahlungsstärke* E_λ [W/cm^{2}µm] (Irradiance) für einfallende Strahlung ist definiert durch die Normalenkomponente von L_λ integriert über den halben sphärischen Raumwinkel:

$$E_\lambda = \int_\Omega L_\lambda \cos\theta \, d\Omega. \tag{G. 2}$$

In Polarkoordinaten gilt

$$E_\lambda = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} L_\lambda(\theta,\phi)\cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi. \tag{G. 3}$$

Bei ausfallender Strahlung wird die entsprechende Größe *spezifische Ausstrahlung* M_λ [W/cm^{2}µm] (Emittance) genannt. Die Definition entspricht ansonsten der spektralen Bestrahlungsstärke E_λ.

Für isotrope Strahlung, d.h. die spektrale Strahldichte ist winkelunabhängig (*Lambert-Reflektor*), erhält man aus (G. 3) nach der Integration für die spektrale Bestrahlungsstärke

$$E_\lambda = \pi L_\lambda. \tag{G. 4}$$

Sollen die Größen nicht spektral betrachtet werden, sondern über den gesamten Wellenlängenbereich, so müssen sie über λ integriert werden. Für die *totale Bestrahlungsstärke* E ergibt sich

$$E = \int_0^\infty E_\lambda \, d\lambda. \tag{G. 5}$$

Falls nicht anders bemerkt, wird in dieser Arbeit auch ohne Indizierung von den spektralen Größen ausgegangen.

2.2 Die Strahlungsemission der Sonne

Die Emission der Sonne kann durch Schwarzkörperstrahlung angenähert werden. Bei einer Temperatur der Photosphäre von 5780° K hat sie nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz ein Maximum bei einer Wellenlänge von 0,48 µm. Die Abb.3 zeigt den Verlauf der spektralen Bestrahlungsstärke für den Fall des idealen schwarzen Körpers und dem gemessenem Verlauf außerhalb der Atmosphäre und auf Meereshöhe.

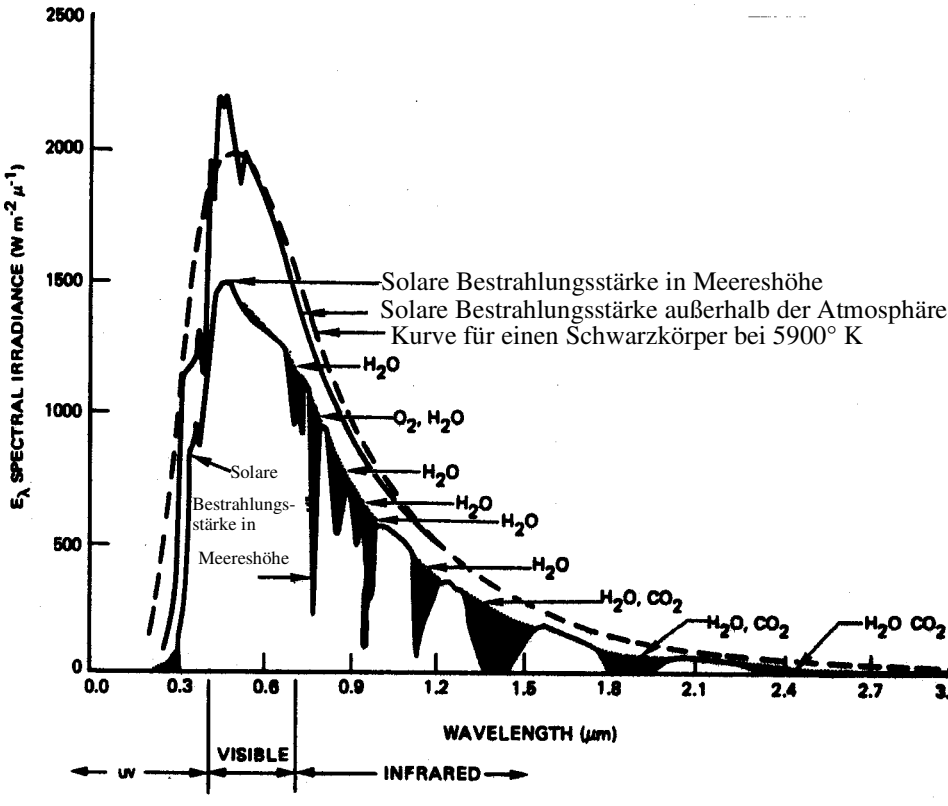


Abb.3 Solare Bestrahlungsstärke (Irradiance) außerhalb der Atmosphäre und in Meereshöhe für einen klaren Himmel (aus [Elachi 1987]).

Zusätzlich ist die Bestrahlungsstärke eines idealen schwarzen Körpers mit T = 5900° K eingezeichnet.

2.3 Strahlungsausbreitung in der Atmosphäre

Die Atmosphäre hat wesentlichen Einfluß auf die Ausbreitung von Strahlung. In Abb.4 ist dies am Beispiel der Transmission dargestellt. Für Modellberechnungen ist es wesentlich, die Eigenschaften und Bestandteile der Atmosphäre und deren Verteilung entlang des Strahlungsweges zu kennen.

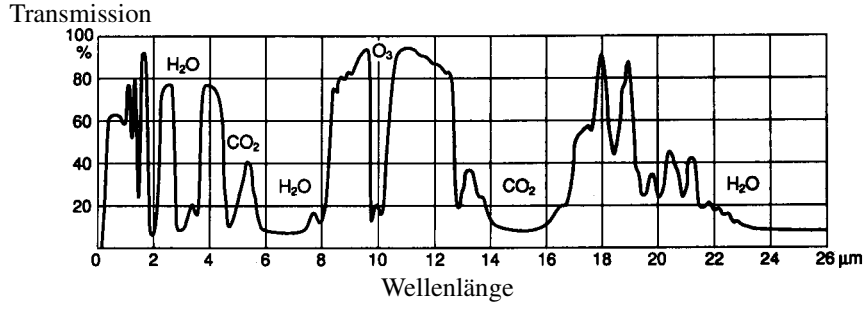


Abb.4 Spektrale Transmission der Atmosphäre im Bereich von 0,2 - 20 μm (aus [Albertz 1991]).

Die Wellenlängenbereiche, in denen die spektrale Transmission der Atmosphäre hoch ist, können besonders gut zur Fernerkundung genutzt werden. Diese Bereiche werden

anschaulich auch *atmosphärische Fenster* genannt. Am wichtigsten sind die Fenster im sichtbaren Licht und im nahem Infrarot (≅ 0,3 - 2,5 µm), im mittleren Infrarot (≅ 3 - 5 µm) und im thermalen Infrarot (≅ 8 - 13 µm).

2.3.1 Aufbau und Zusammensetzung der Atmosphäre

Die Erdatmosphäre (Abb.5) wird gewöhnlich in fünf wesentliche Schichten unterteilt. Diese Schichten unterscheiden sich hauptsächlich durch ihre Gas- und Partikelzusammensetzung, sowie die Temperatur- und Druckverhältnisse.

Zwischen 0 km und 11 km befindet sich die Troposphäre. Charakteristisch ist für sie ein in etwa konstanter Temperaturabfall von 6,5° C pro km Höhe. Der Druck vermindert sich von 1 atm am Boden auf ≅ 0,1 atm in 11 km Höhe. Der hohe Gehalt an H_2O, CO_2, Wolken, Nebel und anderer Partikel in dieser Schicht ist wesentlich für die Strahlungsabschwächung verantwortlich.

Die Stratosphäre schließt sich an die Troposphäre an und endet in etwa 50 km Höhe. Sie hat die höchste Ozonkonzentration. Ozon absorbiert Strahlung unterhalb einer Wellenlänge von 0,3 µm. Sauerstoff absorbiert erst unterhalb 0,185 µm stark, somit ist Ozon für den Schutz vor dieser energiereichen ultravioletten Strahlung verantwortlich.

Die nächste Schicht, die Mesosphäre, erstreckt sich bis in eine Höhe von 90 km. Dies ist häufig die letzte Schicht, die bei Modellen der Strahlungsausbreitung in der Atmosphäre berücksichtigt wird.

Die beiden letzten Schichten sind die Ionosphäre (90 - 300 km) und die Exosphäre (300 - ≅ 500 km). Die Ionosphäre ist optisch transparent, die Exosphäre wird sowohl durch die Erd- als auch durch die Solaratmosphäre beeinflußt.

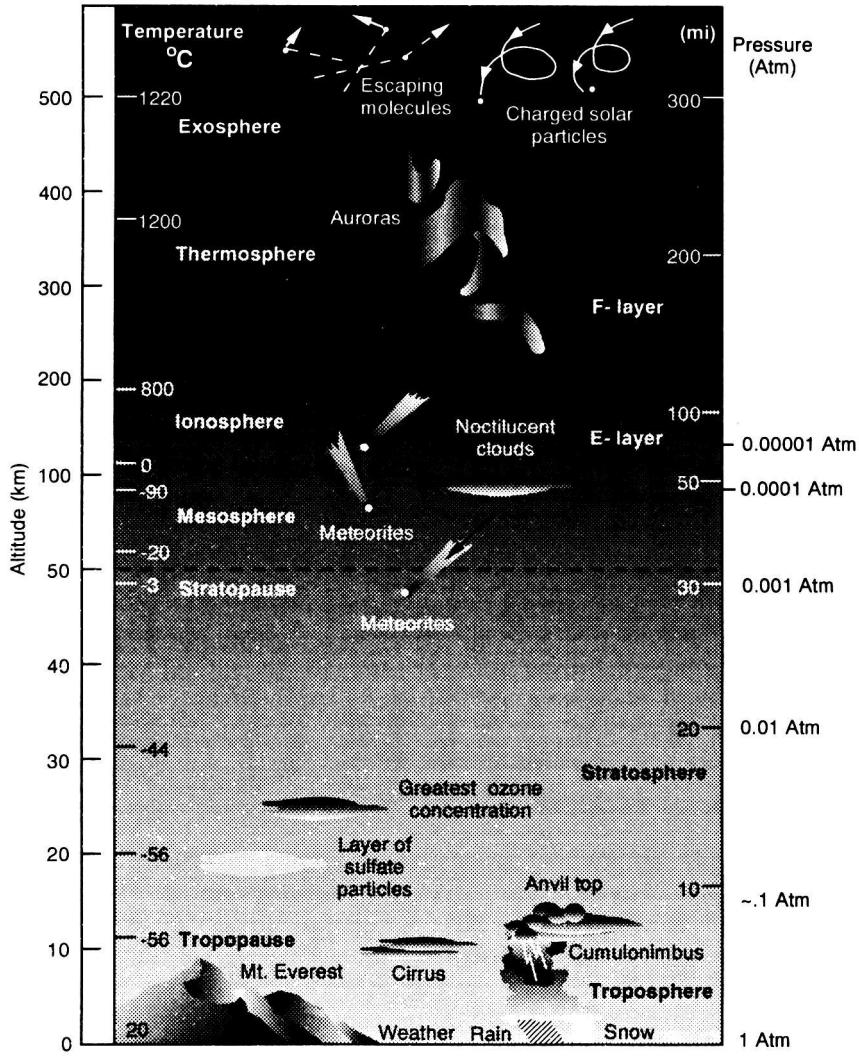


Abb.5 Aufbau der Atmosphäre (aus [Thomas & Duncan 1993])

2.3.1.1 Gase

Bei der Gaszusammensetzung der Atmosphäre kann zwischen Molekülen mit konstantem Volumenanteil bis in eine Höhe von 100 km (Tabelle 1) und Molekülen mit variierendem Anteil (Tabelle 2) unterscheiden werden. Den größten Anteil haben Stickstoff und Sauerstoff. Sauerstoff absorbiert sehr stark im ultravioletten Bereich. Beide sind aber nicht infrarotaktiv, da sie kein elektrisches Dipolmoment besitzen. Allerdings spielen sie bei Streuprozessen eine wichtige Rolle. Die Edelgase haben nur sehr wenig Einfluß auf die Ausbreitung von Strahlung. Trotz ihres geringen Anteils haben die anderen Gase wie CH_4, N_20 und CO aufgrund ihrer spektraler Eigenschaften einen sehr starken Einfluß. Von den Molekülen mit variierendem Anteil haben Wasser, Kohlendioxid und Ozon einen sehr großen Einfluß auf die Strahlung. Die Wasserdampfkonzentration ist sehr stark von den lokalen Wetterbedingungen abhängig. Die Kohlendioxidkonzentration ändert sich im Laufe der Jahre und ist zudem abhängig von der Jahreszeit (Abb.6). Die schwankenden Konzentrationen machen eine Modellberechnung recht schwierig.

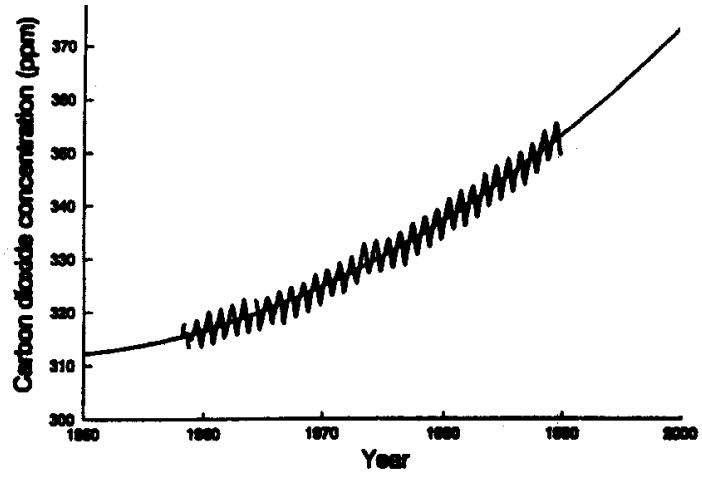


Abb.6 CO_2-Konzentration in Abhängigkeit der Jahreszeit für 1950 - 2000 (aus [Thomas & Duncan 1993]).

Die Konzentration ist im späten Frühjahr am höchsten und im Spätsommer am geringsten.

Tabelle 1 Gase mit konstantem Anteil in einer trockenen Atmosphäre [Thomas & Duncan 1993]

Bestandteil	Volumenanteil in %	Parts per Million
Stickstoff, N_2	78,084 ± 0,004	-
Sauerstoff, O_2	20,946 ± 0,002	-
Argon, Ar	0,934 ± 0,001	-
Neon, Ne	0,001818	18,18 ± 0,04
Helium, He	5,24 x 10^{-4}	5,24 ± 0,004
Krypton, Kr	1,14 x 10^{-4}	1,14 ± 0,01
Xenon, Xe	-	0,087 ± 0,001
Wasserstoff, H_2	-	0,5
Methan, CH_4	-	1,6
Stickoxid, N_20*	-	0,5 ± 0,1

*Unterschiedliche Konzentrationen in verschmutzter Luft.

Tabelle 2 Gase mit variierendem Anteil in der Atmosphäre [Thomas & Duncan 1993]

Bestandteil	Volumenanteil in %	Parts per Million
Ozon, O_3	-	0-0,3 (Troposphäre*)
	-	1-7 (20-30 km)
Wasserdampf H_2O	0-2	-
Kohlendioxid, CO_2	0,035 ± 0,004	351 ± 4
Kohlenmonoxid, CO*	-	0,19
Salpetersäure, HNO_3	-	(0-10) x 10^{-3}
Ammoniak, NH_3	-	Spuren
Schwefelwasserstoff, H_2S	-	(2 - 20) x 10^{-3}
Stickstoffdioxid, NO_2	-	Spuren
Stickstoffmonoxid, NO	-	Spuren

*Unterschiedliche Konzentrationen in verschmutzter Luft.

2.3.1.2 Partikel

In der Atmosphäre treten Partikel sehr unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung, Größe (0,01-10 μm) und Form (rund, elliptisch usw.) auf. Man unterteilt die Partikel in *Aerosole* und *Hydrometeore*. Aerosole sind sehr kleine Partikel (Radius < 1 μm), die in der Atmosphäre suspendiert sind. Dunst (Haze) entsteht im wesentlichen durch Streuung an Aerosolen, da die Streuung an Molekülen wesentlich geringer ist. Die Aerosole haben in Bodennähe die höchste Konzentration. Beispiele für Aerosole sind Smog, Rauch, Staub, bestimmte Wolken. Hydrometeore sind Partikel im flüssigen oder festen Zustand mit einem hohen Wasseranteil. Diese haben meist einen Radius von mehr als 1 μm. Beispiele sind viele Wolkenarten, Nebel, Regen, Hagel und Schnee.

Die Partikelgrößen und Konzentrationen sind sehr unterschiedlich, deshalb wird versucht, heuristisch Partikelgrößen- und Höhenverteilungsfunktionen für Modellrechnungen zu finden. Dabei wird meist vereinfachend von einfachen geometrischen Formen ausgegangen.

2.3.2 Absorption in der Atmosphäre

Die molekulare Absorption ist bei bestimmten Wellenlängen wesentlich für die Transmissionseigenschaften der Atmosphäre verantwortlich. Besonders wichtig sind dabei Wasserdampf und Kohlendioxid, die im wesentlichen die atmosphärischen Fenster bestimmen. Die Absorptionsspektren lassen sich in Rotations-, Vibration-Rotations- und elektronische Spektren aufteilen. Moleküle mit einem elektrischen Dipolmoment können mit dem Photonenfeld koppeln. Der Betrag des elektrischen Dipolmoments bestimmt dabei die Stärke des Überganges. Die Molekülmasse, die relative Position der Atome und die Bindungsenergie bestimmen die spektrale Linienposition des Überganges. Das *Dipolmoment* μ ist definiert als

$$\vec{\mu} = q\vec{r}, \tag{G. 6}$$

wobei q die Ladung und $\vec{r}$ der internukleare Abstand ist.

Bei Molekülen mit völliger Symmetrie ist das Dipolmoment Null. Bei diesen können nur Übergänge aufgrund des Quadrupolmoments auftreten. Diese Übergänge spielen aber bei atmosphärischer Absorption kaum eine Rolle. Beispiele für Moleküle mit $\mu = 0$ sind N_2, O_2, CO_2 und CH_4. Moleküle mit permanentem Dipolmoment können Rotationsübergänge im Infrarot besitzen (sie werden deshalb *infrarotaktiv* genannt). Solche Moleküle (z.B. H_2O, O_3 und CO) werden *polar* genannt. Für infrarotaktive Vibrations-Rotationsübergänge benötigt das Molekül lediglich eine Dipolmomentänderung, die durch eine asymmetrische relative Bewegung der Atome verursacht wird. Somit können auch in unpolaren Molekülen, falls die Vibrationsschwingungen asymmetrisch sind (Beispiele in Abb.7), Vibrationsübergänge auftreten.

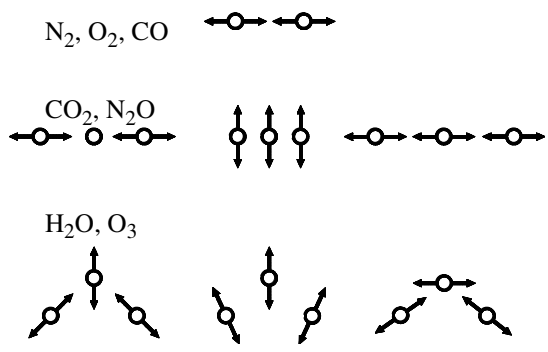


Abb.7 Schematische Darstellung der Vibrationsmodi von N_2, O_2, CO, CO_2, N_2O, H_2O, O_3

2.3.2.1 Schwingungsübergänge

An Hand der elektrischen Dipolnäherung [Bransdon & Joachain 1988] läßt sich zeigen, daß die Übergangsamplituden für Absorption und Emission von Strahlung proportional zu den Matrixelementen des elektrischen *Dipoloperators* **D** sind.

$$\mathbf{D} = e\left(\sum_i Z_i \mathbf{R}_i - \sum_j \mathbf{r}_j\right), \tag{G. 7}$$

wobei der erste Term die Summation über die Positionen $\mathbf{R}_i$ und Ladungen eZ_i der Nukleonen und der zweite Term die Summation über alle Positionen $\mathbf{r}_j$ der Elektronen ist. Die Diagonalelemente von **D**, die dem permanentem elektrischen Dipolmoment im Zustand α entsprechen, sind gegeben durch

$$\mathbf{D}_{\alpha\alpha} = \langle \Psi_\alpha | \mathbf{D} | \Psi_\alpha \rangle. \tag{G. 8}$$

Dabei ist Ψ_α die gesamte Wellenfunktion des Moleküls im Zustand α. Dieser Zustand ist durch die Quantenzahlen s (elektronischer Zustand), ν (Vibrationsquantenzahl), J (Rotationsquantenzahl), M_J (magn. Rotationsquantenzahl) und M_L (magn. Bahndrehimpulsquantenzahl) gegeben. Bei Molekülen mit permanentem elektrischen Dipolmoment (z.B. HCl) können somit Rotationsübergänge stattfinden. Reine Rotationsübergänge sind durch die Auswahlregel $\Delta J = \pm 1$ bestimmt.

Vibrationsübergänge aufgrund von Strahlung können stattfinden, wenn das Matrixelement

$$\mathbf{D}_{\nu'\nu} = \int \psi_{\nu'}^{*} \mathbf{D}(R)\, \psi_\nu dR \tag{G. 9}$$

nicht verschwindet. Dabei sind $\psi_{\nu'}$ und ψ_ν die reinen Vibrationswellenfunktionen (in erster Näherung Wellenfunktionen eines harmonischen Oszillators) und R der internukleare Abstand. Falls **D** unabhängig von R ist, verschwindet das Integral (G. 9) aufgrund der Orthogonalität der beiden Wellenfunktionen. Falls **D** von R abhängt, kann man eine Taylorentwicklung durchführen und erhält

$$\mathbf{D}(R) = \mathbf{D}(R_0) + (R - R_0) \left.\frac{d\mathbf{D}}{dR}\right|_{R = R_0} + \ldots . \tag{G. 10}$$

Daraus lassen sich die Auswahlregeln für Vibrations-Rotationsübergänge, $\Delta v = 1$ und $\Delta J = \pm 1, 0$; bestimmen.

2.3.2.2 Energieniveaus

Da die Energieniveaus der Rotations-, Vibrations- und elektronischen Übergänge relativ stark auseinander liegen ($E_{el} > E_{vib} > E_{rot}$), können sie getrennt betrachtet werden. Rotationsspektren treten typischerweise im fernen Infrarot (100 µm - 10 cm), Vibrationsspektren im mittleren und nahen Infrarot (1 µm - 100 µm) und elektronische Spektren im Sichtbarem und im Ultravioletten auf.

Die Energieniveaus der Rotationsspektren unterscheiden sich durch die geometrische Form des Moleküls (linear, spherical-top, symmetric-top), durch die experimentell bestimmbaren Rotationskonstanten A, B und C [cm^{-1}] (Tabelle 3) und den Entartungsgrad g_J. Für ein lineares Molekül (N_2, H_2, O_2, CO, OH usw.) gilt A = C = 0 und

$$E(J) = hcBJ(J+1) \text{ und } g_J = 2J+1 \quad . \tag{G. 11}$$

Für spherical-top Moleküle (z.B. CH_4) gilt A = B = C und

$$E(J) = hcBJ(J+1) \text{ und } g_J = (2J+1)^2 \quad . \tag{G. 12}$$

Tabelle 3 Rotationskonstante B für einige Moleküle

Molekül	B [cm^{-1}]
H_2	60,85
N_2	2,01
O_2	1,45
N_2O	0,42

Ein N-atomiges Molekül hat 3N - 6 Vibrationsmodi (lineare Moleküle 3N - 5). Die entsprechenden Energieniveaus sind gegeben durch

$$E(v_1, v_2, v_3, \ldots) = hc\left(\sum_i \upsilon_i\left(v_i + \frac{1}{2}\right) + \sum_i \sum_{k \geq i} x_{ik}\left(v_i + \frac{1}{2}\right)\left(v_k + \frac{1}{2}\right)\right), \tag{G. 13}$$

wobei v_i die Vibrationsquantenzahl des i-ten Modus, υ_i die i-te harmonische Schwingungsfrequenz und x_{ik} ein Korrekturfaktor für den anharmonischen Anteil sind. Die meisten Vibrationsübergänge in der Atmosphäre treten vom Vibrationsgrundzustand (0 = $v_1 = v_2 = \ldots$) aus auf.

Für elektronische Übergänge wird eine recht hohe Energie benötigt, was dazu führt, daß in der Atmosphäre diese Übergänge vor allem im energiereichen ultravioletten Bereich möglich sind. Die stärksten Absorptionen werden dabei von O_2 (ab 0,195 µm) und O_3 (ab 0,3 µm) verursacht. Auf Grund dieser starken Absorption messen die meisten Sensoren erst ab dem sichtbaren Bereich.

2.3.2.3 Kontinuum-Absorption

Außer Molekülabsorptionen in diskreten Linien, treten in der Atmosphäre Kontinuum-Absorptionen auf. Diese haben nur eine geringe Wellenlängenabhängigkeit. Die genauen physikalischen Vorgänge sind noch nicht völlig geklärt. Es wird davon ausgegangen, daß die Kontinuum-Absorption u.a. durch Überlagerung entfernter Flanken der verschiedenen Absorptionslinien zustande kommt. Die Kontinuum-Absorptionen von Wasserdampf (3 - 5 μm und 8 - 14 μm), Kohlendioxid (bei 4,3 μm), Sauerstoff (bei 6 μm) und Stickstoff (4,3 μm) sind im Infrarot von Bedeutung.

Die Kontinuum-Absorption wird durch empirische Gleichungen, die an Messungen angepaßt werden, beschrieben (siehe [Thomas & Duncan 1993]).

2.3.3 Streuung in der Atmosphäre

Neben der Absorption von Strahlung sind Streuprozesse für die Ausbreitung in der Atmosphäre wesentlich. Es wird im wesentlichen zwischen Streuung an Aerosolen (*Mie-Streuung*) und an Molekülen (*Rayleigh-Streuung*) unterschieden.

2.3.3.1 Streuung an Aerosolen

Die Streugrößen bei Streuung an Aerosolen können mit der Mie-Theorie [Thomas & Duncan 1993] berechnet werden. Für eine Aerosolteilchendichte N, die Mie'sche Streufunktion $Q(\lambda, r)$ und den Radius der Aerosole r ergibt sich der Streukoeffizient (in km^{-1}) als

$$\sigma_A(\lambda,r) = N\pi r^2 Q(\lambda, r). \qquad \text{(G. 14)}$$

Die Streuung an Aerosolen ist nur gering von der Wellenlänge abhängig.

2.3.3.2 Streuung an Molekülen

Die Streuung an Molekülen (auch Rayleigh-Streuung genannt) entsteht an einem Dipolmoment, induziert durch die einfallende Strahlung. Rayleigh-Streuung ist somit ein elastischer Streuprozeß. Der molekulare Streukoeffizient nimmt mit der vierten Potenz der Wellenlänge ab:

$$\sigma_A \sim \frac{1}{\lambda^4}. \qquad \text{(G. 15)}$$

Die Rayleigh-Streuung ist dementsprechend besonders stark im sichtbaren Bereich. In der Atmosphäre sind, bedingt durch ihre großen Volumenanteile, vor allem Stick- und Sauerstoff daran beteiligt.

2.4 Objekteigenschaften

Für das Reflexionsverhalten sind Objekteigenschaften wie chemische Zusammensetzung, Oberflächenbeschaffenheit und Dicke maßgebend. Die gesamte eingestrahlte Energie wird von einem Objekt in typischen Anteilen reflektiert, absorbiert oder transmittiert. Für Systeme im thermischen Gleichgewicht gilt wegen der Energieerhaltung:

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1, \qquad \text{(G. 16)}$$

dabei ist $\rho(\lambda)$ der *spektrale Reflexionsgrad*, $\alpha(\lambda)$ der *spektrale Absorptionsgrad* und $\tau(\lambda)$ der *spektrale Transmissionsgrad*.

Bei der reflektierten Strahlung wird zwischen direkter und diffuser Reflexion unterschieden. Häufig tritt eine diffuse Reflexion mit einem zusätzlichen Anteil an direkter Reflexion auf (Abb.8).

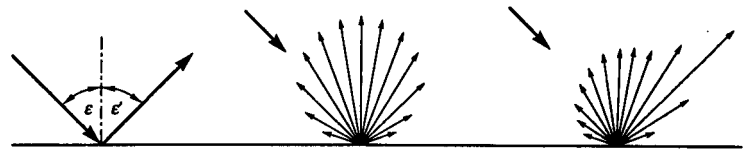


Abb.8 Spiegelnde, diffuse (lambert'sche) und gemischte Reflexion an einer Oberfläche (aus [Albertz 1991])

Ein isotrop (diffus) reflektierendes Objekt wird auch Lambert-Reflektor genannt. Die Strahldichte L ist dabei winkelunabhängig und es gilt für die Bestrahlungsstärke

$$E = \int_{\Omega} L \cos\theta \, d\Omega = \pi L. \qquad \text{(G. 17)}$$

Da die wenigsten Objekte auch nur annähernd Lambert-Reflektoren sind, werden die Reflexionseigenschaften durch eine bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion γ (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) beschrieben. Die BRDF ist folgendermaßen definiert

$$\gamma(\lambda,\theta_r,\phi_r,\theta_e,\phi_e) = \frac{dL(\lambda,\theta_r,\phi_r,\theta_e,\phi_e)}{dE(\lambda,\theta_e,\phi_e)}. \qquad \text{(G. 18)}$$

Dabei entspricht $dL(\lambda,\theta_r,\phi_r,\theta_e,\phi_e)$ der reflektierten Strahldichte in Richtung (θ_r,ϕ_r) verursacht durch die aus der Richtung (θ_e,ϕ_e) einfallende Bestrahlungsstärke $dE(\lambda,\theta_e,\phi_e)$. Die BRDF wird in Einheit $[sr^{-1}]$ gemessen. Bei einer völlig gerichteten Reflexion wäre die BRDF eine Delta- Funktion. Abb.9 zeigt ein Beispiel für eine BRDF.

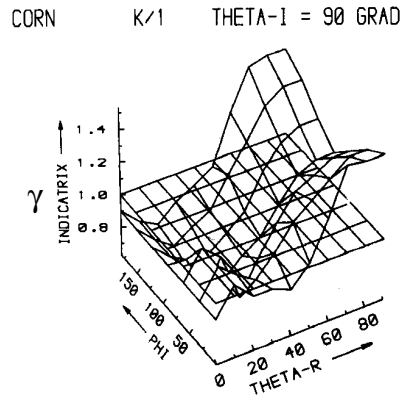


Abb.9 BRDF (γ [sr^{-1}]) für Getreide (aus [Busen 1989])

Theta-I : Zenithwinkel der einfallenden Strahlung
Theta-R: Zenithwinkel der reflektierten Strahlung
PHI: relativer Azimuthwinkel zwischen einfallender und reflektierter Strahlung

Der *bidirektionale Reflexionsfaktor* R_F beschreibt das Verhältnis zwischen reflektierter Strahldichte einer Fläche und der Strahldichte eines idealen Lambert-Reflektors bei gleichen Bestrahlungs- und Beobachtungsbedingungen. Er ist definiert durch

$$R_F(\lambda,\theta_r,\phi_r,\theta_e,\phi_e) = \pi\gamma(\lambda,\theta_r,\phi_r,\theta_e,\phi_e) \; . \qquad \text{(G. 19)}$$

Dieser Faktor kann bei spiegelnder Reflexion größer 1 werden.

Der *gerichtete hemisphärische Reflexionsgrad* ρ (oder kurz Reflexionsgrad) ist durch

$$\rho(\lambda,\theta_r,\phi_r,2\pi) = 2\int_0^{2\pi} R_F(\lambda,\theta_r,\phi_r,\theta_e,\phi_e)\, sin\theta_e\, cos\theta_e\, d\theta_e \qquad \text{(G. 20)}$$

gegeben. Dies entspricht dem Verhältnis des in der Beobachtungsrichtung reflektierten Strahlungsflusses zum über den gesamten Halbraum einfallenden Strahlungsfluß.

Für einen diffusen Reflektor (Lambert-Reflektor) mit einem spektralen Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ gilt

$$L_R(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{\pi} E_g(\lambda) \; . \qquad \text{(G. 21)}$$

Dabei ist $L_R(\lambda)$ die Strahldichte der reflektierten Strahlung und $E_g(\lambda)$ die globale spektrale Bestrahlungsstärke (auch spektrale Globalstrahlung genannt).

Für den Begriff Reflexionsgrad wird in dieser Arbeit meist die Bezeichnung Reflektanz verwendet.

2.4.1 Beispiele von Reflexionseigenschaften

Die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Objekten (Oberflächen) sind, neben räumlichen Eigenschaften und Texturen, wesentliche Grundlage für die Verarbeitung und Interpretation multispektraler Aufnahmen. Abb.10 zeigt typische Reflexionsspektren unterschiedlicher Objekte.

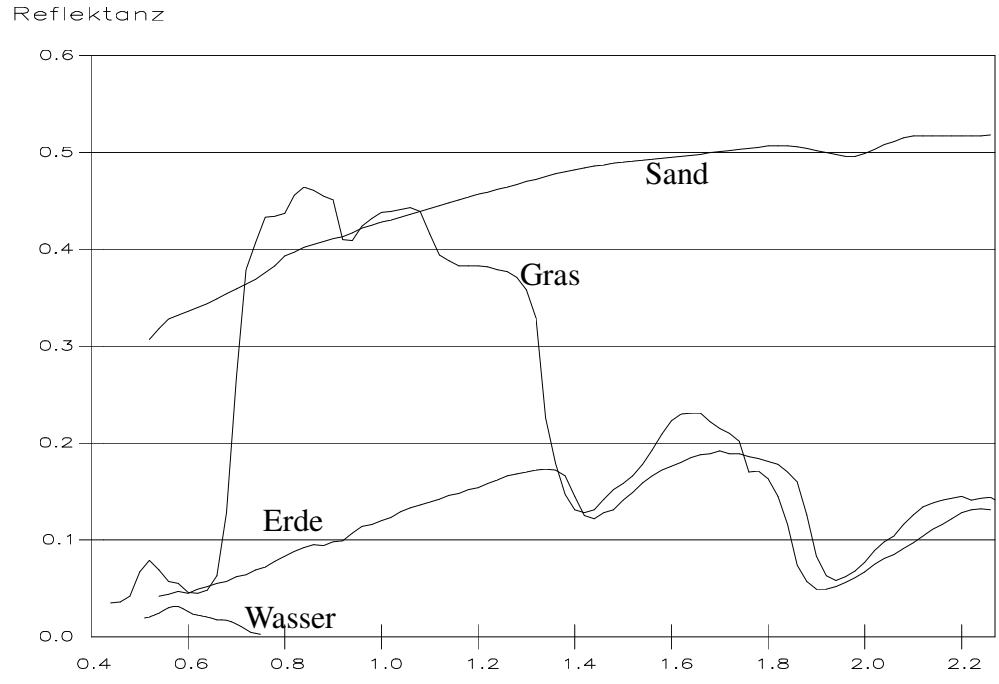


Abb.10 Reflektanzspektren von Sand-, Gras- , Wasser und Erd-Proben
Daten aus [NASA 1985], $\Delta\lambda = 0{,}02\ \mu m$

Vegetationsspektren sind besonders dadurch charakterisiert, daß sie ein leichtes Maximum im grünen ($\cong 0{,}55\ \mu m$) Spektralbereich (entsprechend ihrem grünen Aussehen), ein Minimum im roten ($\cong 0{,}68\ \mu m$) und einen starken Anstieg zwischen dem roten und nahem infraroten Bereich aufweisen. Dieser Anstieg wird auch 'Rote Flanke' (Red Edge) genannt und ist wesentlich für die Charakterisierung von Vegetation. Durch Bildung des entsprechenden Quotienten NIR/Rot[1] erhält man den sogenannten Vegetationsindex. Typisch für Wasserflächen ist eine geringe Reflexion im Sichtbaren und eine sehr hohe Absorption im Infrarot (starke Vibrations-Rotations-Banden von H_2O). Die Reflexion im Sichtbaren wird vor allem durch suspendierte Sedimente und Plankton hervorgerufen.

2.5 Strahlung am Sensor

Am Sensor kommt nicht nur Strahlung der beobachteten Fläche an, sondern zusätzlich auch noch Strahlung, die von der Sonne kommend direkt in Richtung des Sensors gestreut wurde. Von den umgebenden Flächen der zu beobachteten Fläche wird Licht diffus in Richtung des Sensors gestreut. Dies wird als *Überstrahlungseffekt* (Adjacency Effect) bezeichnet. Dieser Effekt ist besonders groß bei dunklen Flächen, die von wesentlich helleren Flächen umgeben sind.

1. folgende Abkürzungen sind gebräuchlich:
VIS - visible
NIR - near infrared
MIR - mid infrared
TIR - thermal infrared

3 Das Experiment

Im Rahmen der Projekte „Physikalische Grundlagen der Fernerkundung“ und „OSCAR“ wurden von der DLR Oberpfaffenhofen im Auftrag von „OSCAR“ Überfliegungen des Flughafengebietes Nürnberg durchgeführt. Im folgendem werden die Überfliegungen und der dabei eingesetzte Multispektralscanner beschrieben.

3.1 Die Überfliegungen

Die Überfliegungen wurden am 21. August 1991 und am 25. April 1992 von der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt durchgeführt. Bei beiden Überfliegungen wurden außer Scanneraufnahmen des Daedalus AADS 1268 auch S/W-Luftbilder mit einer Zeiss-Kamera[1] (auf die nicht näher eingegangen wird) gemacht. Die Flüge fanden in 300 m, 900 m und 1800 m Höhe statt.

Als Fluggebiet wurde die Umgebung des Nürnberger Flughafens (Abb.11) gewählt.

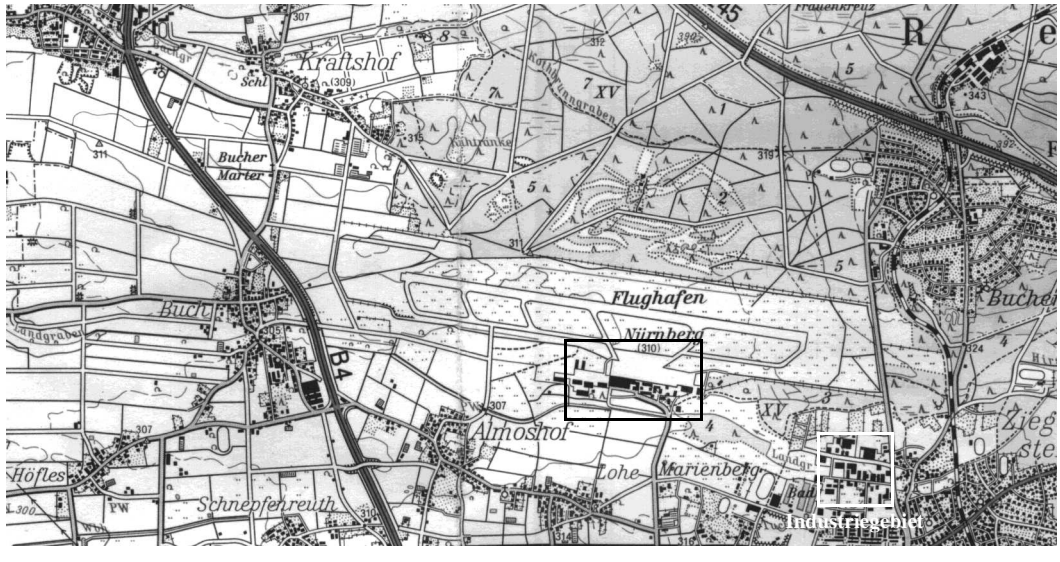


Abb.11 Lageplan der Überfliegungen

Zusätzlich sind die häufig verwendeten Bildausschnitte „Flughafen“ und „Industriegebiet“ eingezeichnet. (Eingescannt aus „Topographische Karte, 1:50000, L6532, Nürnberg, Bayerisches Landesvermessungsamt München, 1987.)

1. Fotographische Aufnahmesysteme sind u.a. in [Albertz 1991] beschrieben.

3.2 Der Sensor

Bei den in Nürnberg durchgeführten Überfliegungen wurde ein 11-Kanal Multispektralscanner des Typs AADS1268 der Firma Daedalus Enterprises Inc. eingesetzt. Der Sensor besteht aus den Komponenten Scan-Kopf, vertikales Gyrometer, Digitalisierer, Bedienungskonsole und Magnetband-Recorder. Der Sensor tastet das Target (wie in Abb.12 dargestellt) quer zur Flugrichtung ab. Innerhalb des Scan-Bereichs von ± 42,96° werden 716 Bodenelemente, sowie Zusatzdaten, aufgezeichnet.

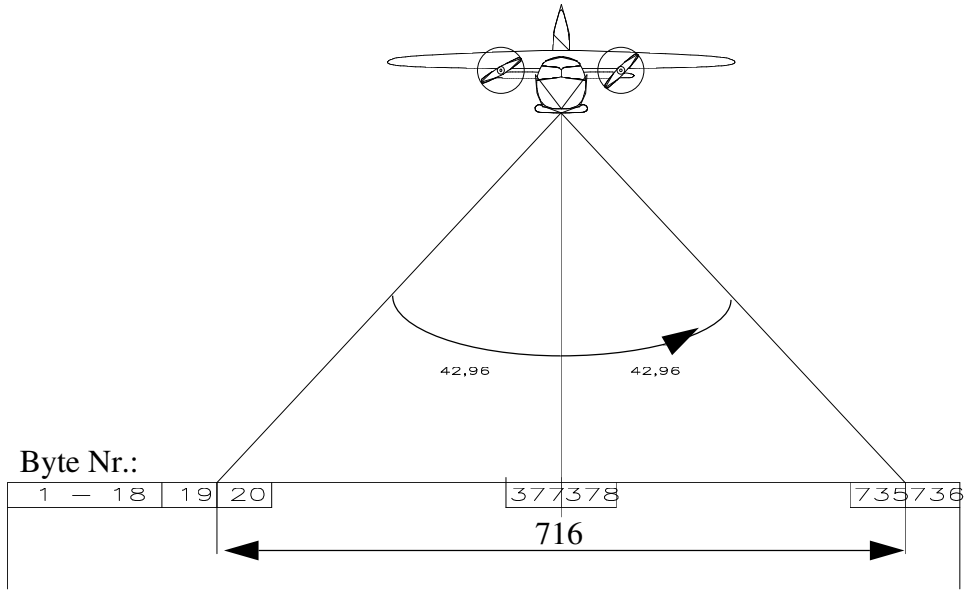


Abb.12 Aufnahmegeometrie und Datenformatierung

Byte
1-4: .....Scanzeilenzähler
5-8: .....Eingabedaten
9-12: .....Temperaturen Thermalreferenz 1,2
13-17: .....Externe Digitaldaten
18:.....Statusinformation (Verstärkung,...)
19:.....Videowert Thermalreferenz 1
20-735: .....Videobereich
736:.....Videowert Thermalreferenz 2

3.2.1 Scan-Kopf/Spektrometer

Diese Einheit des Sensors läßt sich in die Bereiche Optik/Teleskop und Spektrometer/Detektor unterteilen (Abb.13).

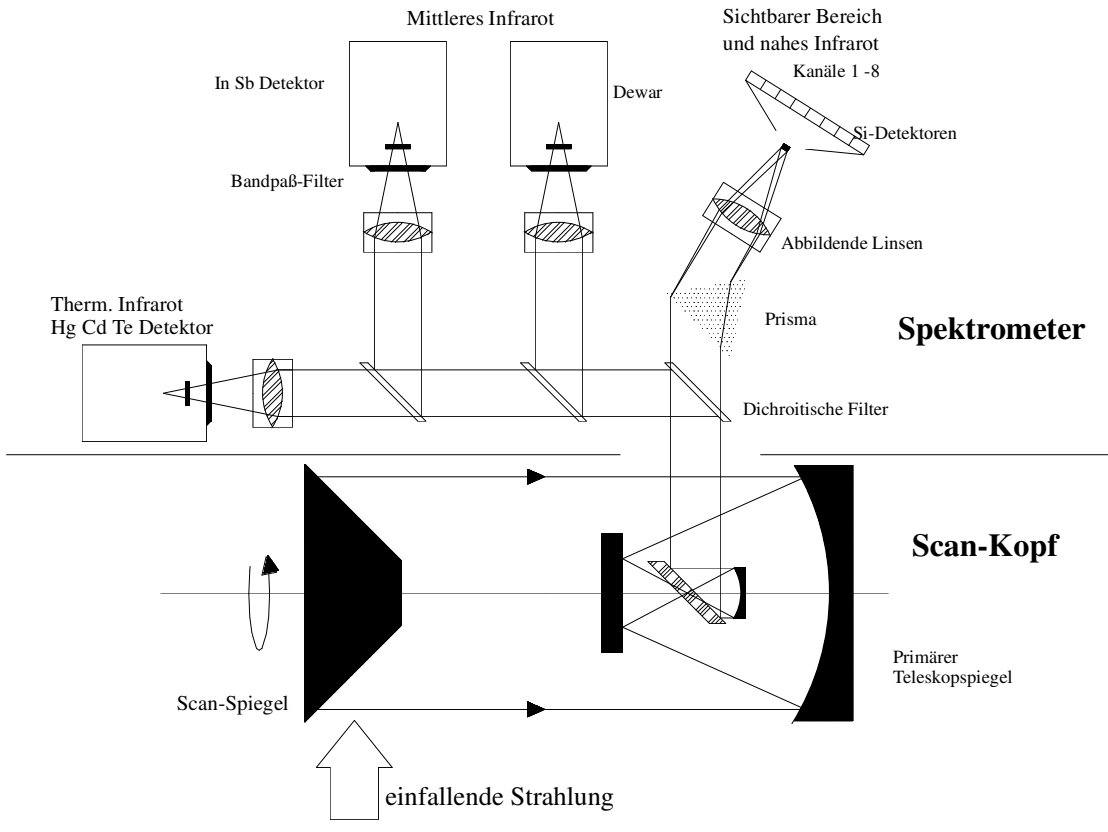


Abb.13 Schematischer Aufbau des Scan-Kopfs und Spektrometers des Daedalus Scanners

Der rotierende Spiegel reflektiert die Strahlung auf einen Parabolspiegel. Von diesem gelangt sie über weitere Spiegel in die Spektrometereinheit. Dort wird die Strahlung durch dichroitische Filter in vier Spektralbereiche aufgeteilt. Der erste Bereich entspricht der sichtbaren und nahen infraroten Strahlung. Diese wird durch ein Prisma aufgespalten und durch eine fokussierende Linse auf eine Detektorreihe von acht CCDs gelenkt. Die anderen Bereiche (2 x MIR, TIR) werden auf Detektoren, die mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden, gelenkt. Durch diesen Strahlengang ist sichergestellt, daß alle Detektoren Strahlung des selben Flächenelementes messen.

Zur Kalibration des thermischen Kanals sind zwei Schwarzkörperstrahler (für niedrige und hohe Temperatur) vorhanden. Deren Temperatur kann entsprechend den äußeren Bedingungen eingestellt werden. Der Scanner mißt am Anfang und Ende einer Scan-Linie jeweils die Strahlungstemperatur der Schwarzkörperstrahler.

Der rotierende Spiegel kann mit vier Geschwindigkeiten (12,5; 25; 50; 100 Scanlinien/s) betrieben werden. Die Geschwindigkeit muß entsprechend der Flughöhe eingestellt werden. Die Bestandteile und Anordnung der Optik bestimmen die räumliche Auflösung (IFOV, Instantaneous Field of View). In unserem Fall war der Sensor so ausgestattet, daß die geometrische Auflösung 2,5 mrad betrug. Damit entspricht ein Bildelement (Pixel) in 300 m Flughöhe einem Bodenelement von 75 x 75 cm^2. Die spektrale Auflösung und die Detektormaterialien sind in Tabelle 4 beschrieben.

Tabelle 4 Spektrale Auflösung und Detektormaterial

Kanal	Spektralbereich in µm	Bandbreite in µm	Detektormaterial
1	0,42 - 0,45	0,03	Silizium
2	0,45 - 0,52	0,07	Silizium
3	0,52 - 0,60	0,08	Silizium
4	0,605 - 0,625	0,02	Silizium
5	0,63 - 0,69	0,06	Silizium
6	0,695 - 0,75	0,055	Silizium
7	0,76 - 0,90	0,14	Silizium
8	0,91 - 1,05	0,14	Silizium
9	1.55 - 1.75	0,2	Indium Antimonit (InSb)
10	2,08 - 2,35	0,27	Indium Antimonit (InSb)
11	8,5 - 13,0	4,5	Quecksilber-Kadmium-Tellurit (HgCdTe)

Die Abb.14 zeigt die Spektralbereiche des Scanners und das entsprechende Spektrum einer Grasfläche aus einem Reflektanzbild (siehe Abschnitt 5.3). Zum Vergleich ist ein hochaufgelöstes Spektrum aus Bodenmessungen eingezeichnet. Daran ist zu erkennen, daß die beiden Spektren gut miteinander vergleichbar sind. Der Informationsgehalt des hochaufgelösten Spektrums ist natürlich wesentlich höher.

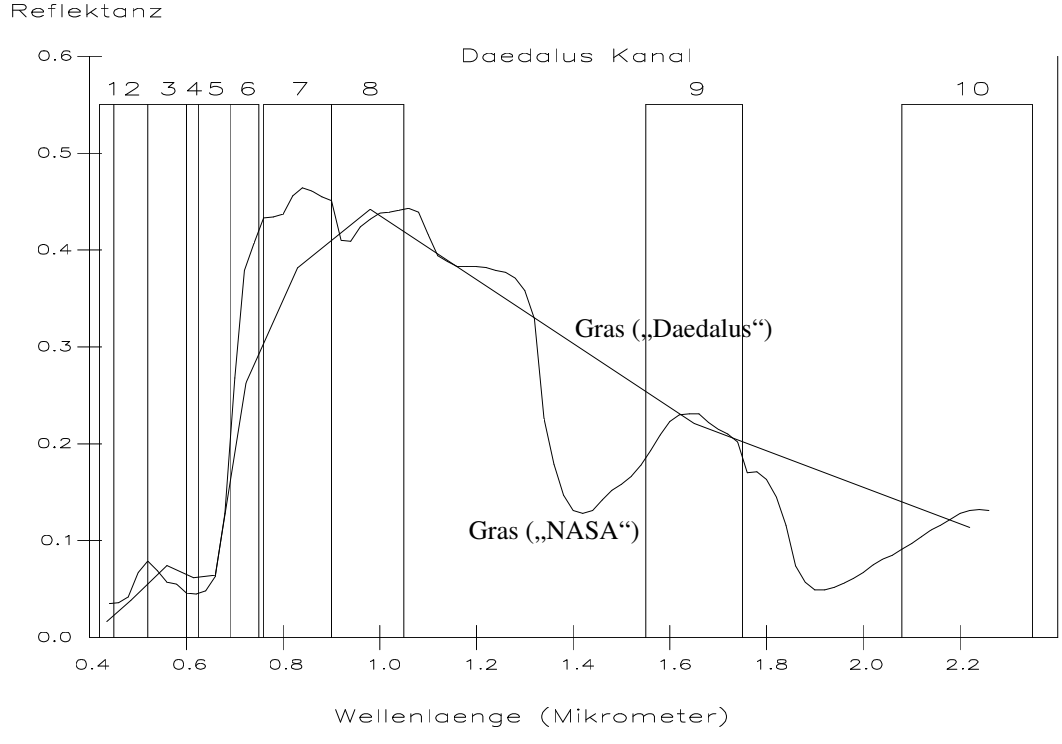


Abb.14 Spektralbereiche des Daedalus AADS 1268

Es ist das korrigierte 10-Kanal Daedalus AADS 1268-Reflektanzpektrum einer Grasfläche und zum Vergleich ein hochaufgelöstes ($\Delta\lambda$ = 0,02 µm) Spektrum eines Grases (Nr. 74) [NASA 1985] eingezeichnet.

Die Spektralbereiche der Kanäle wurden so gewählt, daß sie innerhalb der atmosphärischen Fenster (siehe Abb.4) liegen.

3.2.2 Gyrometer

Die Meßdaten des am Scan-Kopf angebrachten Gyrometers dienen der Korrektur des Videosignals bei Drehbewegungen des Flugzeugs um dessen Längsachse. So können Drehbewegungen von bis zu ±15° ausgeglichen werden (Roll-Kompensation).

3.2.3 Analog/Digital-Wandler

Der Analog/Digital-Wandler wandelt bis zu 12 analoge Eingabesignale des Detektors/Vorverstärkers in acht-Bit Worte um. Er synchronisiert zusätzlich die Ausgabe des Videosignals mit internen Daten (siehe Abschnitt 3.2.6). Der A/D-Wandler kann mit fünf verschiedenen Verstärkungsfaktoren (0,5; 1; 2; 4; 8) betrieben werden. Die thermischen Videodaten können kontinuierlich im Verstärkungsfaktor und im Offset beeinflußt werden. Der Kanal 12 dient der Erweiterung des Dynamikumfangs des thermischen Kanals (durch andere Verstärkungsfaktoren).

3.2.4 Bedienungskonsole

Im Flugzeug können über eine Konsole die Timing-Logik, Roll-Kompensation und die Stromversorgung (und damit die Schwarzkörpertemperaturen) der einzelnen Komponenten gesteuert werden. Die Wellenform des Videosignals kann beobachtet werden.

3.2.5 Magnetbandrecorder

Die digitalen Signale werden auf HDDTs (High Density Digital Tapes) mit einer Datendichte von 10000 bits/inch geschrieben. Deshalb muß die Aufnahmegeschwindigkeit entsprechend der Scanrate eingestellt werden. Die maximale Aufnahmegeschwindigkeit beträgt 60 inch/s (ca. 1,5 m/s) bei einer Abtastrate von 100 Scans/s. Die Daten können nach dem Flug auf CCTs (Computer Compatible Tapes) überspielt werden.

3.2.6 Datenformat

Zusätzlich zu den Videodaten werden noch weitere sogenannte 'housekeeping' Daten für jede Scanlinie aufgezeichnet. Sie beinhalten Zusatzinformation über den Aufnahmevorgang. Wesentliche Parameter sind dabei thermale Referenzen (niedrige und hohe Temperatur in °C), Video-Verstärkungsfaktoren und Kanalnummern.

3.3 Kalibration des Scanners

Der Daedalus AADS 1268 wurde von der DLR am 7. August 1991 und am 6. Juni1992 im Labor kalibriert. Dazu wurde die Testbench Daedalus AB532 verwendet. Mit ihr kann der Scanner auf die Größe Strahldichte L $\left[W/cm^2 \mu msr \right]$ kalibriert werden. Es gilt dabei die lineare Beziehung

$$L = c_0 + c_1 \frac{G}{V}, \qquad \text{(G. 22)}$$

dabei sind c_0 und c_1 $\left[W/cm^2 \mu m sr\right]$ die Kalibrationskoeffizienten, G der Grauwert und V der Verstärkungsfaktor des A/D-Wandlers (siehe Abschnitt 4.4.1).

In Tabelle 5 sind die Kalibrationswerte für die beiden Überflüge aufgeführt. Es sind ebenfalls Kalibrationswerte einer Flugkalibration von Dezember 1990 über Rügen eingetragen.

		7.8.1991	6.6.1992	Flugkalibration Rügen Dez. 1990	
Kanal	Wellenlänge [µm]	c_1 [W/m^{2}srµm]	c_1 [W/m^{2}srµm]	c_0 [W/m^{2}srµm]	c_1 [W/m^{2}srµm]
1	0,42 - 0,45	0,486	0,730	0,6	0,117
2	0,45 - 0,52	0,451	0,522	3,895	0,481
3	0,52 -0,60	0,368	0,432	9,597	0,481
4	0,605 - 0,625	0,486	0,568	2,50	0,760
5	0,63 - 0,69	0,344	0,401	0,208	0,5259
6	0,695 - 0,75	0,426	0,493	-1,618	0,605
7	0,76 - 0,90	0,792	0,910	3,245	1,0736
8	0,91 - 1,05	1,325	1,374	-3,238	1,7657
9	1,55 - 1,75	0,254	0,253	0,9688	0,3498
10	2,08 - 2,35	0,120	0,118	0,550	0,1344
		Bei der Laborkalibration ist $c_0 = 0$			

Tabelle 5 Kalibrationswerte des Daedalus AADS 1268

Auffällig ist, daß sich die Werte der Laborkalibration zwischen den beiden Jahren in den ersten sieben Kanälen (Silizium-Detektoren) recht stark geändert haben. Die Werte der Flugkalibration weichen teilweise erheblich von den Laborwerten ab. In Abschnitt 5.2.3 wird anhand der Bilddaten untersucht, welche Kalibrationswerte am besten zu verwenden sind.

Nach Aussage von Herrn V. Amann (DLR) liegen die absoluten Fehler der Kalibration zwischen sechs und zehn Prozent. Die relativen Abweichungen zwischen den spektralen Kanälen betragen zwei bis vier Prozent.

3.4 Konvertierungen der Originaldaten

Wie bereits in Abschnitt 3.2.6 erwähnt, enthalten die Originaldaten nicht nur die Videodaten, sondern auch Zusatzinformationen. Für den praktischen Einsatz der Videodaten ist es daher sinnvoll, diese zu extrahieren. Dies wurde von der Gruppe OSCAR durchgeführt, wobei als Bildformat das gebräuchliche TIFF-Format (Tagged Image File Format) gewählt wurde. Die Zusatzdaten wurden ebenfalls in, von den TIFF-Bildern getrennte, TIFF-Dateien extrahiert.

Das TIFF-Format hat außer der Kompatibilität zu vielen Bildverarbeitungsprogrammen, den Vorteil, daß die Bilddaten kanalweise in getrennte Verzeichnisse eines TIFF-Bildes geschrieben werden können. Somit ist eine exakte Zuordnung der Pixel für die verschiedenen Kanäle gewährleistet.

3.5 Bildverarbeitungsprogramme

Die Bildauswertung und -verarbeitung wurde unter UNIX auf SUN-Workstations durchgeführt. Zur Bildverarbeitung wurde *Khoros* und *OBVIUS* eingesetzt.

Khoros ist ein in „C“ geschriebenes Software-Entwicklungstool zur Bildverarbeitung, Visualisierung und Signalverarbeitung unter X-Windows. Es wurde an der „University of New Mexico“ entwickelt.

Für die Klassifikationen wurde *OBVIUS* (Object-Based Vision and Image Understanding System) [Heeger & Simoncelli 1991] eingesetzt. Es ist ein auf Common Lisp und *CLOS* (Common Lisp Object System) aufgebautes Bildverarbeitungssystem. *OBVIUS* bietet eine flexible interaktive Benutzerschnittstelle, einen Lisp-Interpreter und die Möglichkeit objektorientierter Programmierung.

4 Erzeugung von Reflektanzbildern

Am Beispiel des im vorherigen Kapitels beschriebenen Daedalus AADS 1268 Scanners werden nun die Verfahren zur Erzeugung multispektraler Reflektanzbilder beschrieben. Diese können recht einfach für andere flugzeuggestützte Scanner modifiziert werden.

4.1 Grundlagen

Für einen Lambert-Reflektor mit einem Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ (Reflektanz) ist die von einer Oberfläche reflektierte Strahldichte - ohne Berücksichtigung der Atmosphärenprozesse - durch folgende Gleichung bestimmt:

$$L_R(\lambda) = \frac{E_g(\lambda)\,\rho(\lambda)}{\pi}. \qquad \text{(G. 23)}$$

Dabei ist $E_g(\lambda)$ die Bestrahlungsstärke am Boden. Der Faktor $1/\pi$ kommt durch die Annahme eines Lambert-Reflektors zustande (G. 4).

Werden die Atmosphäreneinflüsse und somit die direkte und diffuse Transmission (τ_{dir} und τ_{dif}) berücksichtigt, ändert sich (G. 23) folgendermaßen:

$$L_{Sensor}(\lambda) = \frac{E_g(\lambda)\,\rho(\lambda)\,[\tau_{dir} + \tau_{dif}]}{\pi} + L_0(\lambda) \qquad \text{(G. 24)}$$

Hier setzt sich die Strahldichte am Sensor aus einem reflektierten Anteil und aus der Streustrahlung $L_0(\lambda)$ zusammen. Der reflektive Anteil ist proportional dem Produkt aus einfallender Globalstrahlung am Boden, dem Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ und dem direkten und diffusen Transmissionsgrad für den Strahlungsweg vom Boden zum Sensor.

Zur Berechnung des Reflexionsgrads $\rho(\lambda)$ für eine am Sensor gemessene Strahldichte L_{Sensor}, müssen die Größen $E_g(\lambda)$, τ_{dir}, τ_{dif} und L_0 bestimmt werden. Diese Berechnungen können mit dem Modell *SENSAT-4* durchgeführt werden.

4.2 Das Modell SENSAT-4

Das Modell *SENSAT-4* („Sensor-Atmosphäre-Target“) [Richter 1992-2] ist ein Computerprogramm zur Simulation der Prozesse bei der Fernerkundung. Es umfaßt die Simulation von Sensoren, den Einfluß von verschiedenen Targets auf die Strahldichte am Sensor und die Berechnung der benötigten Größen zur Erzeugung von Reflektanzbildern. Zur Bestimmung der Strahlungsübertragung in der Atmosphäre wird das Modell *LOWTRAN-7* des Geophysics Directorate at Hanscom Air Force Base (ehem. Air Force Geophysics Laboratory and Air Force Cambridge Research Laboratory, USA) [ONTAR 1991] verwendet.

Im folgendem werden die Modelle *LOWTRAN-7* und die zur Erzeugung von Reflektanzbildern benötigten Funktionen des Gesamtpaketes *SENSAT-4* kurz beschrieben.

4.2.1 LOWTRAN-7

Das Computermodell *LOWTRAN-7* ist eine Weiterentwicklung des 1972 herausgegebenen Programms *LOWTRAN-2*. Es bestimmt die atmosphärische Strahlungsübertragung und/oder die Strahldichte für eine spektrale Auflösung von 20 cm^{-1}[1] im Bereich der solaren Reflexion und thermischen Emission von 0,3 - 30 µm . Dabei werden folgende physikalische Effekte berücksichtigt:

- Molekulare Absorption und Streuung,
- Kontinuums-Absorption,
- Aerosol-Absorption und Streuung.

Die Atmosphäre wird im Modell durch bis zu 32 Schichten dargestellt. Die Schichtstärke beträgt 1 km bis zu einer Höhe von 25 km, 5 km von 25 - 50 km und 20 km und 30 km für die beiden letzten Schichten. Dies entspricht einer Gesamthöhe der Atmosphäre von 100 km. Für jede Schicht werden die Strahlungsabschwächung und der Brechungsindex getrennt bestimmt und entlang des vorgegebenen Ausbreitungsweges aufsummiert. Die physikalische und chemische Zusammensetzung und Eigenschaften der Schichten können durch Modellatmosphären und Aerosolmodelle (Tabelle 6) für unterschiedliche Regionen und Jahreszeiten vorgegeben werden. Bei entsprechenden Kenntnissen über die Atmosphäre (z.B. Radiosondenmessung, Lidarmessung) können die Atmosphärenschichten dementsprechend abgeändert bzw. neu definiert werden. Ebenso kann zwischen verschiedenen Verteilungsfunktionen für Temperatur, Druck, Wasserdampf- und Ozongehalt der Modellatmosphären geeignet gewählt werden.

Tabelle 6 Standardatmosphären und Aerosolmodelle

Standardatmosphären	Aerosolmodelle (Auszug)
1. Tropisch (15° N, Juli)	1. ländliches Aerosol
2. Sommer in mittleren Breiten (45° N, Juli)	2. städtisches Aerosol
3. Winter in mittleren Breiten (45° N, Januar)	3. maritimes Aerosol
4. Subarktischer Sommer (60° N, Juli)	4. Regen
5. Subarktischer Winter (60° N, Januar)	5. Nebelmodelle
6. US Standard 1976	6. Wolken

4.2.2 SENSAT-4

Das Modell *SENSAT-4* berechnet, unter Benutzung der *LOWTRAN-7*-Ergebnisse, für vorgegebene Reflexionsgrade des Targets die Strahldichte am Sensor.

Um die Strahldichte am Sensor entsprechend (G. 24) zu bestimmen, sind mehrere Rechenschritte notwendig. Die folgenden Gleichungen beziehen sich immer auf ein Wellenlängenintervall von λ_1 bis λ_2, entsprechend einem Kanal des Sensors.

Da sich die Ergebnisse aus *LOWTRAN-7* auf kleine Wellenlängenintervalle beziehen (z.B. 20 cm^{-1}, müssen sie in dem Bereich λ_1 bis λ_2 über die Wellenlänge integriert werden. Dabei wird auch das spektrale Ansprechverhalten des Sensors, das durch die Apparatefunktion $\Gamma(\lambda)$ (siehe Abb.15) charakterisiert ist, berücksichtigt.

1. dies entspricht: $\Delta\lambda \cong 0{,}2$ nm bei $\lambda = 0{,}3$ µm und $\Delta\lambda \cong 2$ µm bei $\lambda = 30$ µm.

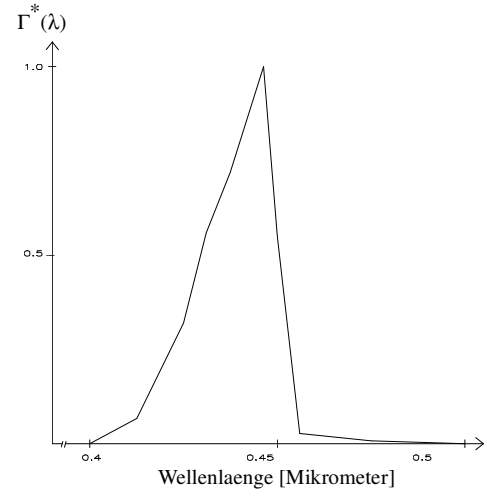


Abb.15 Im Labor gemessene Apparatefunktion des Kanals 2 des Daedalus AADS 1268

Die Normierung einer unnormierten spektralen Response-Funktion $\Gamma^*(\lambda)$ ist gegeben durch

$$\Gamma(\lambda) = \frac{\Gamma^*(\lambda)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Gamma^*(\lambda)\, d\lambda}. \qquad \text{(G. 25)}$$

Der normierte direkte Transmissionsgrad τ_{dir} bestimmt sich aus dem von *LOWTRAN-7* berechneten Transmissionsgrad $\tau_{dir}(\lambda)$ folgendermaßen:

$$\tau_{dir} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{dir}(\lambda)\, \Gamma(\lambda)\, d\lambda. \qquad \text{(G. 26)}$$

Der diffuse Transmissionsgrad τ_{dif} kann durch folgende Gleichung bestimmt werden:

$$\tau_{dif} = \frac{\pi\,[L_p(\rho > 0) - L_p(\rho = 0)]}{\rho E_{global}}. \qquad \text{(G. 27)}$$

Dabei ist L_p die normalisierte Streustrahlung $L_p(\lambda)$ aus *LOWTRAN-7*

$$L_p = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_p(\lambda)\, \Gamma(\lambda)\, d\lambda \qquad \text{(G. 28)}$$

und E_{global} die normalisierte Bestrahlungsstärke am Boden (auch Globalstrahlung genannt):

$$E_{global} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{global}(\lambda)\, \Gamma(\lambda)\, d\lambda. \qquad \text{(G. 29)}$$

Um den diffusen Transmissionsgrad in (G. 27) zu bestimmen, müssen in zwei *LOWTRAN-7*-Läufen mit unterschiedlichen Reflexionsgraden (z.B. $\rho = 0$ und $\rho = 0{,}3$) die entsprechenden Streustrahlungen $L_p(\lambda)$ bestimmt werden. Deren Differenz ist dann maßgebend für den diffusen Transmissionsgrad.

Ausgehend von (G. 24) müßte nun für jede am Sensor gemessene Strahldichte ein

LOWTRAN-7-Lauf zur Berechnung des Reflexionsgrads durchgeführt werden (bei einem 8 bit Dynamikbereich des A/D-Wandlers entspräche dies 256 Läufen). Außerdem ergeben sich bei flugzeuggestützten Sensoren mit einem großen Scanwinkelbereich sehr viele unterschiedliche Aufnahmegeometrien (bei Daedalus AADS 1268 sind es 716), die in getrennten *LOWTRAN-7*-Läufen berücksichtigt werden müßten. Für den Daedalus AADS 1268 wären es also 183296 Läufe pro Kanal (dies entspricht einer Rechenzeit auf einer SUN® LX von ungefähr einem Monat).

Um die Rechenzeit wesentlich zu reduzieren, wird nun für wenige Winkelstützstellen und für nur vier Reflexionsgrade (ρ = 0; 0,1; 0,3; 0,6) die Strahldichte am Sensor bestimmt. Zur Erzeugung von Reflektanzbildern muß dementsprechend zwischen den Winkelstütztstellen und den Reflexionsgraden interpoliert werden. Die Tabelle 7 zeigt einen Auszug aus einer Ergebnistabelle von *SENSAT-4* (sogenannte „atm-Datei“). Sie wurde für vier Reflexionsgrade und für 33 Winkelstützstellen erzeugt.

Tabelle 7 Auszug aus einem *SENSAT-4*-Ergebnis („atm-Datei“)

0.0000E+00 0.4860E-01 C0, C1, L (MILLI-W/CM*CM*SR*MICROMETER)				
Winkel	L (R = 0%)	L (R = 10%)	L (R = 30%)	L(R = 60%)
- 43.0	0.28268E+00	0.36713E+01	0.10644E+02	0.21590E+02
-40.3	0.26255E+00	0.36551E+01	0.10636E+02	0.21596E+02
...	...	...	...	...
-21.5	0.19518E+00	0.36032E+01	0.10617E+02	0.21632E+02
...	...	...	...	...
0.0	0.19239E+00	0.36053E+01	0.10629E+02	0.21662E+02
...	...	...	...	...
21.5	0.24246E+00	0.36505E+01	0.10664E+02	0.21679E+02
...	...	...	...	...
40.3	0.33127E+00	0.37236E+01	0.10704E+02	0.21663E+02
43.0	0.34903E+00	0.37375E+01	0.10710E+02	0.21656E+02
Ergebnisse für: 300m Flughöhe, 35km Sichtweite, 21.8.’91, 14:50 Uhr				

Die *SENSAT-4*-Ausgabedatei *.senprint enthält weitere Ergebnisse wie Transmissionsgrade, Globalstrahlung und die Strahldichte auf Sensorhöhe für die verschiedenen Winkelstützstellen und Reflexionsgrade.

4.3 Programmablauf von LOWTRAN und SENSAT-4

In Abb.16 sind der Programmablauf und die benötigten Dateien schematisch dargestellt (für den Fall von flugzeuggestützten Sensoren im reflektiven Spektralbereich). Das Programm sensat_input, das in Abschnitt 8.1.1 genauer beschrieben wird, erzeugt sämtliche Eingabedateien für die Programme *LOWTRAN-7* und *SENSAT-4*. Das Programm wurde so geschrieben, daß die Eingabedateien mit möglichst wenig Aufwand erzeugt werden können: Es werden nur Parameter abgefragt, die für die Korrektur von Aufnahmen des Daedalus AADS 1268 nötig sind. Sämtliche anderen Parameter (wie z.B. die Wellenlängenintervalle der Kanäle) sind innerhalb des Programms als Konstanten oder #define-Anweisungen definiert. Die benötigten Dateien werden automatisch für alle zehn Kanäle im reflektiven Spektralbereich erzeugt. Folgende Eingaben sind nötig:

- Modellatmosphäre,
- Aerosolmodell,

- Sichtweite,
- Sonnenstand: Zenith und Azimuth,
- Flugrichtung,
- Tag des Jahres (wird zur Bestimmung des Abstandes Erde - Sonne benötigt).

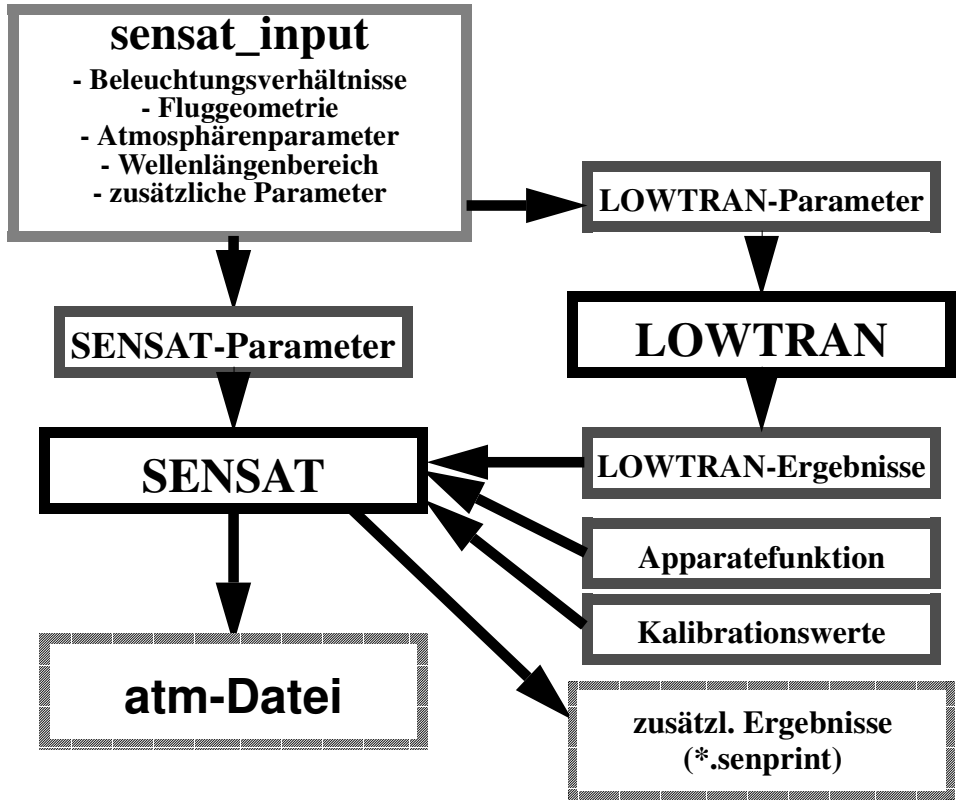


Abb.16 Programmablauf[1] von LOWTRAN-7 und SENSAT-4

Für das Programm *SENSAT-4* müssen noch zwei Dateien mit den Daten der Apparatefunktion und der Kalibration der zehn Spektralkanäle vorhanden sein. *SENSAT-4* erzeugt als Ergebnisausgabe eine „atm-Datei“ (siehe Tabelle 7) und eine weitere Datei (*.senprint) mit zusätzlichen Ergebnissen (Transmissionsgrade, globale Strahldichte,...).

4.4 Das Programm zur Erzeugung von Reflektanzbildern

Um mit den *SENSAT-4*-Ergebnissen aus dem Originalbild im TIFF-Format (Tagged Image File Format) ein Reflektanzbild zu erzeugen, wurde das Programm ref_image (genauere Beschreibung in Abschnitt 8.1.3) geschrieben. Es erzeugt aus den Daten der atm-Datei, den Zusatzinformationen (‘housekeeping data‘) des Sensors (diese wurden aus den Originaldaten in zusätzliche TIFF-Dateien extrahiert) und den originalen Bilddaten (im TIFF-Format) das Reflektanzbild. In Abb.17 ist dies schematisch dargestellt.

1. Die Kalibrationswerte werden von *SENSAT-4* lediglich in die atm-Dateien übertragen.

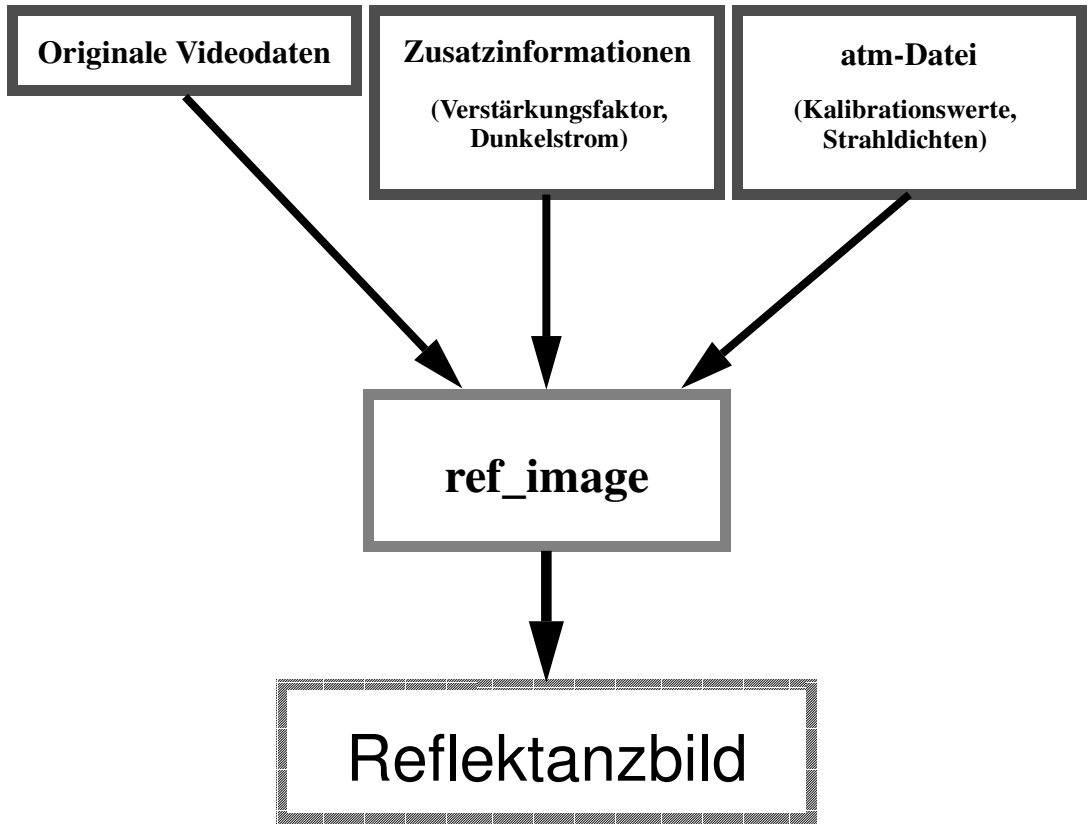


Abb.17 Schematische Darstellung des Programmablaufs von ref_image zur Erzeugung eines Reflektanzbildes.

4.4.1 Berechnungen im Programm *ref_image*

Das Programm *ref_image* berechnet für jedes Pixel aus dem Grauwert des Originalbildes die gemessene Strahldichte. Anschließend wird, entsprechend der Reihenposition des Pixels (sie entspricht dem Scan-Winkel), in der entsprechenden Zeile der „atm-Datei“ durch lineare Interpolation berechnet, welcher Reflexionsgrad der gegebenen Strahldichte entspricht. Da die Strahldichten nur für wenige Winkelstützstellen (in dieser Arbeit z.B. 33) von *SENSAT-4* berechnet werden, wird dazwischen linear interpoliert (bei dem Daedalus AADS 1268 sind dies 716 verschiedene Scan-Winkel). Diese Werte werden nur einmal je Kanal am Programmanfang berechnet und dann gespeichert.

Die vom Sensor gemessene Strahldichte ist für jeden Spektralkanal gegeben durch

$$L = c_0 + c_1 \frac{G}{V}, \tag{G. 30}$$

wobei c_0, c_1 $\left[W/cm^2 \mu m sr\right]$ die Kalibrationskoeffizienten des entsprechenden Kanals sind. G ist der Grauwert (bei 8 Bit: 0 - 255) des Pixels im Originalbild; der Verstärkungsfaktor V des A/D-Wandlers ist in den Bildzusatzinformationen für jede Scan-Linie enthalten. Da der Daedalus AADS 1268 vor und nach einer Scan-Linie den Dunkelstrom mißt, muß (G. 30) leicht modifiziert werden:

$$L = c_0 + c_1 \left[\frac{G}{V} - G_{DC} \right] . \tag{G. 31}$$

Der Dunkelstrom G_{DC} (dark current) ist ebenfalls in den Bildzusatzinformationen als Grauwert enthalten.

Das Programm erzeugt so ein Reflektanzbild im TIFF-Format mit zehn den Kanälen entsprechenden Verzeichnissen. Dabei entspricht G = 0 einer Reflektanz von 0% und G = 255 einer Reflektanz von 100%.

4.5 Der Überstrahlungseffekt

In den bisherigen Berechnungen wird der Überstrahlungseffekt (Abschnitt 2.5) nicht berücksichtigt. Der Einfluß der Flächen, die das betrachtende Bodenelement umgeben, müßte genau genommen bereits innerhalb der Atmosphärenkorrektur (*LOWTRAN-7*) berücksichtigt werden. Da der Rechenaufwand dafür aber immens steigen würde, wird ein in [Richter 1992-1] vorgeschlagenes näherungsweises Verfahren angewendet. Die Berechnungen müssen dabei mit den Daten der Reflektanzbilder durchgeführt werden.

Für jedes Pixel wird zuerst der mittlere Reflexionsgrad $\bar{\rho}$ für ein N x N Pixel großes Fenster berechnet:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N^2} \rho_i . \qquad \text{(G. 32)}$$

Der korrigierte Reflexionsgrad ρ' wird durch

$$\rho' = \rho + q\,(\rho - \bar{\rho}) \qquad \text{(G. 33)}$$

bestimmt. Der Faktor q wird in *SENSAT-4* bestimmt durch

$$q = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{dif}(\lambda)}{\tau_{dir}(\lambda)} \Gamma(\lambda)\, d\lambda \qquad \text{(G. 34)}$$

und ist ein Maß für die Stärke des Überstrahlungseffektes. Der Faktor q entspricht dem normierten Verhältnis zwischen diffusem und direktem Transmissionsgrad.

Bei flugzeuggestützten Sensoren ist der q-Faktor winkelabhängig. Zur Korrektur des Reflektanzbildes müssen die *SENSAT-4* Ergebnisse zwischen den Winkelstützstellen linear interpoliert werden.

Das zur Korrektur des Überstrahlungseffektes geschriebene Programm *adj_image* bestimmt zuerst die q-Werte für alle Bildspalten. Anschließend wird für jedes Pixel (die durch das N x N große Fenster bedingten Ränder werden nicht berücksichtigt) und jeden Kanal des Reflektanzbildes entsprechend Gleichung (G. 33) der korrigierte Reflexionsgrad bestimmt.

5 Anwendung der Atmosphärenkorrektur

In diesem Kapitel wird beschrieben, mit welchen *SENSAT-4*-Eingabeparametern Reflektanzbilder aus den originalen Aufnahmen von Nürnberg erzeugt wurden. Es wird anhand spektraler Objekteigenschaften untersucht, welche Atmosphärenparameter und Kalibrationswerte (Laborkalibration oder Flugkalibration) am besten zu verwenden sind. Mit dieser Auswahl wird dann die spektrale Ähnlichkeit von Objekten aus den multitemporalen Reflektanzbildern überprüft. Die Grundlagen für einen quantitativen Vergleich der Reflektanzspektren werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

5.1 Grundlagen der quantitativen Analyse multispektraler Daten

Allgemein können jedem Pixel eines multispektralen digitalen Bildes die Meßwerte (Grauwerte) der N Kanäle des Sensors zugeordnet werden. Mathematisch kann dies durch einen *Pixelvektor* $\vec{x}$, dessen N Komponenten x_i (i = 1,...,N) die Grauwerte der einzelnen Kanäle enthalten, dargestellt werden:

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ : \\ x_N \end{bmatrix} . \qquad \text{(G. 35)}$$

In der Mustererkennung wird der durch die Komponenten von $\vec{x}$ aufgespannte euklidische Raum Merkmalsraum und $\vec{x}$ dementsprechend auch Merkmalsvektor genannt.

Werden nun nicht einzelne Pixel, sondern mehrere (K) Pixel betrachtet, ist der mittlere Pixelvektor $\vec{m}$ definiert durch

$$\vec{m} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^{K} \vec{x}_j, \qquad \text{(G. 36)}$$

dabei sind $\vec{x}_j$ die ingesamt K Pixelvektoren.

Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt im Vergleich der Reflektanzspektren von gleichen Flächen (Spektralklassen) aus unterschiedlichen Aufnahmen. Da die komponentenweise Betrachtung der mittleren Pixelvektoren und der dazugehörigen Standardabweichungen zum Vergleich der Spektren nicht besonders aussagekräftig ist, wurde der normierte Abstand d zwischen zwei mittleren Pixelvektoren $\vec{m}_a$ und $\vec{m}_b$, der hier definiert wird als

$$d = \frac{\left|\vec{m}_a - \vec{m}_b\right|}{\frac{1}{2}\left|\vec{m}_a + \vec{m}_b\right|}, \qquad \text{(G. 37)}$$

verwendet.

5.2 Eingabeparameter

Im folgendem werden die verwendeten *SENSAT-4* Eingabeparameter beschrieben.

5.2.1 Sonnenstand und Aufnahmegeometrie

In Tabelle 8 sind die Eingabeparameter für den Sonnenstand und die Aufnahmegeometrien für die verschiedenen Aufnahmen aufgeführt. Dabei wurde für die Uhrzeit die mittlere Zeit während der jeweiligen Überflüge gewählt (sie dauerten je Flughöhe bis zu 20 Minuten). Die Sonnenstände wurden aus Datum und Uhrzeit sowie geographischer Länge und Breite mit Hilfe astronomischer Programme berechnet.

Tabelle 8 Sonnenstand und Aufnahmegeometrie

Aufnahme	Uhrzeit MESZ	Azimuth Sonne	Zenith Sonne	Flugrichtung	Tag des Jahres
21. 8. 1991 - 300m	14:50	202,8°	41,0°	280°	233
21. 8. 1991 - 1800m	13:00	172,6°	37,6°	280°	233
25. 4. 1992 - 300m	13:20	179,7°	36,0°	280°	116
25. 4. 1992 - 1800m	11:50	155,6°	40,6°	280°	116
Die Uhrzeit und die Flugrichtung wurden den Aufnahmeprotokollen der DLR entnommen.					

5.2.2 Atmosphärenparameter

Für die Atmosphärenkorrektur (*LOWTRAN-7*) wurde das Standardatmosphärenmodell „Sommer in mittleren Breiten“ mit den darin enthaltenen Standardprofilen für Temperatur, Druck, relative Luftfeuchtigkeit und Gas- und Partikelverteilungen verwendet. Für diese Größen standen keine genaueren Messungen (z.B. durch Radiosondenaufstieg) zur Verfügung. Die Sichtweite lag, laut Deutschem Wetterdienst, Wetteramt Nürnberg [DWD 1991/92], bei beiden Überfliegungen zwischen 25 km und 50 km.

Zur genaueren Bestimmung der Sichtweite wurden für die Sichtweiten 15, 25 und 35 km Reflektanzbilder der Szenen „Industriegebiet“ und „Flughafen“ für die Flughöhen 300 m und 1800 m erzeugt. Daraus wurden die Reflektanzspektren ausgewählter Oberflächen bestimmt. Gleiche Atmosphärenbedingungen während der Überflüge vorausgesetzt, sollten die Spektren gleicher Oberflächen bei den beiden Aufnahmehöhen möglichst gut übereinstimmen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß eine exakte Übereinstimmung der betrachteten Bodenelemente durch die unterschiedlichen geometrischen Auflösungen und Verzerrungen nicht möglich ist. Um diese Fehlerquelle möglichst gering zu halten, wurden möglichst große homogene und isotrop reflektierende Flächen gewählt.

Da während der Durchführung dieser Arbeit keine Ortsbesichtigung stattfand, können nur Vermutungen über die Materialien der verschiedenen Objekte angestellt werden. Dunkle Flachdächer können z.B. aus beschichteten (heller Sand) oder unbeschichteten Bitumenbahnen, einer Vielzahl möglicher Kunststoffolien oder auch aus dunklen Schieferschindeln bestehen. Deshalb werden in dieser Arbeit, obwohl eigentlich die spektralen Eigenschaften der Materialien ausschlaggebend sind, meist die Namen der Objekte ver-

wendet.

Die Abb.18, Abb.19 und Abb.20 zeigen Reflektanzspektren aus Reflektanzbildern unterschiedlich vorgegebener Sichtweiten und Aufnahmehöhen von „1991“.

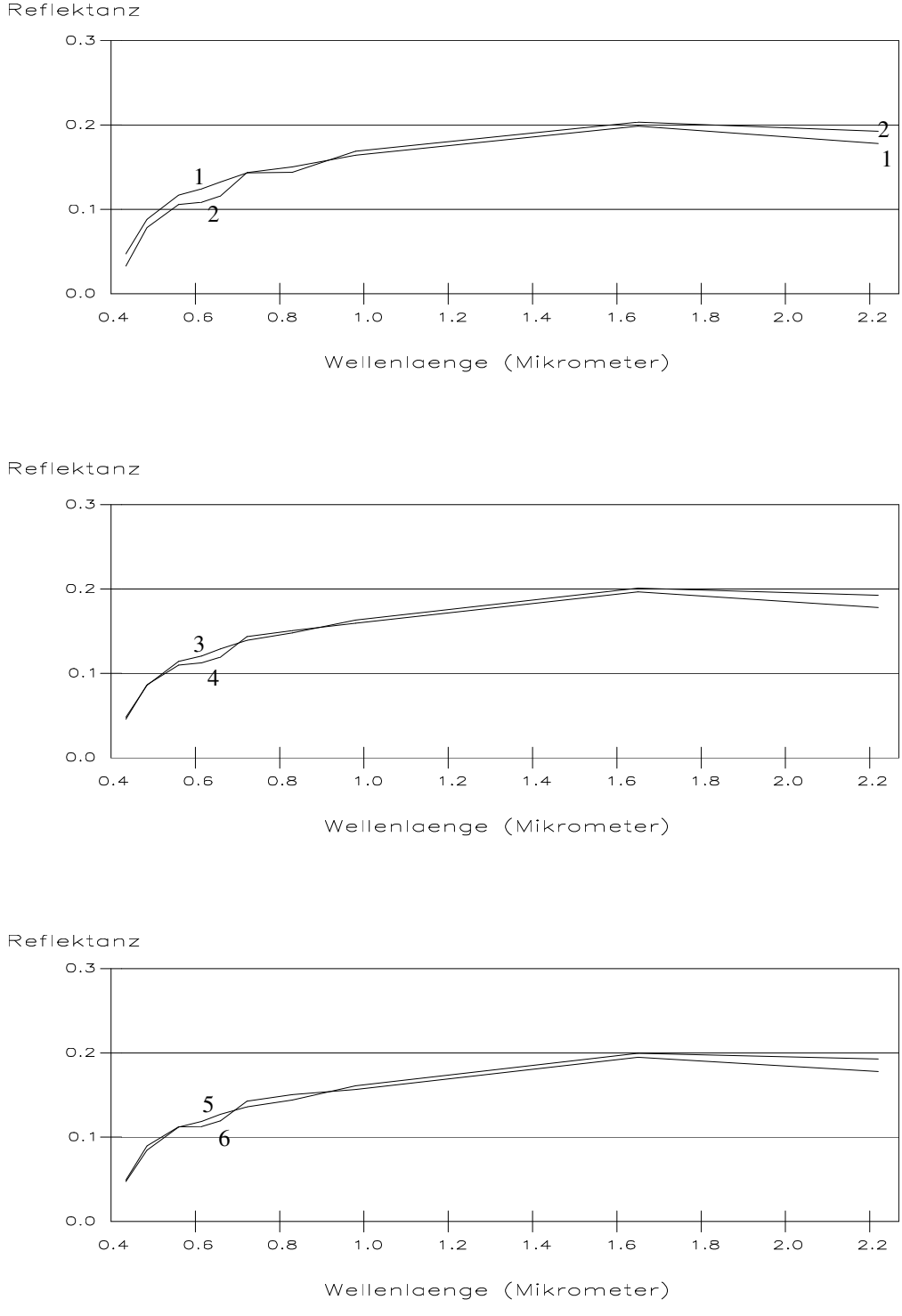


Abb.18 Reflektanzspektren eines Hausdaches (Dach0 in Abb.39) bei „300 m und 1800 m, 1991“ unter Variation des Parameters „Sichtweite“

1: Sichtweite = 15 km, 300 m
2: Sichtweite = 15 km, 1800 m
3: Sichtweite = 25 km, 300 m
4: Sichtweite = 25 km, 1800 m
5: Sichtweite = 35 km, 300 m
6: Sichtweite = 35 km, 1800 m

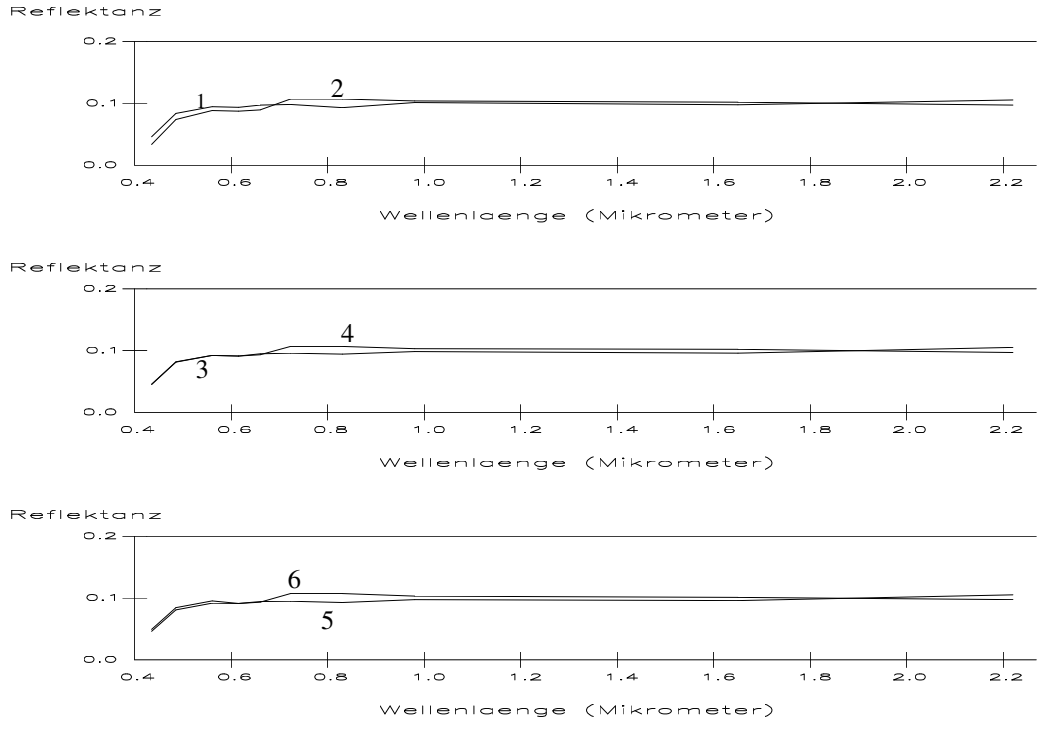


Abb.19 Reflektanzspektren einer Straße (Straße3 in Abb.39) bei „300m und 1800m, 1991“ unter Variation des Parameters „Sichtweite“

1: Sichtweite = 15 km, 300 m 2: Sichtweite = 15 km, 1800 m
3: Sichtweite = 25 km, 300 m 4: Sichtweite = 25 km, 1800 m
5: Sichtweite = 35 km, 300 m 6: Sichtweite = 35 km, 1800 m

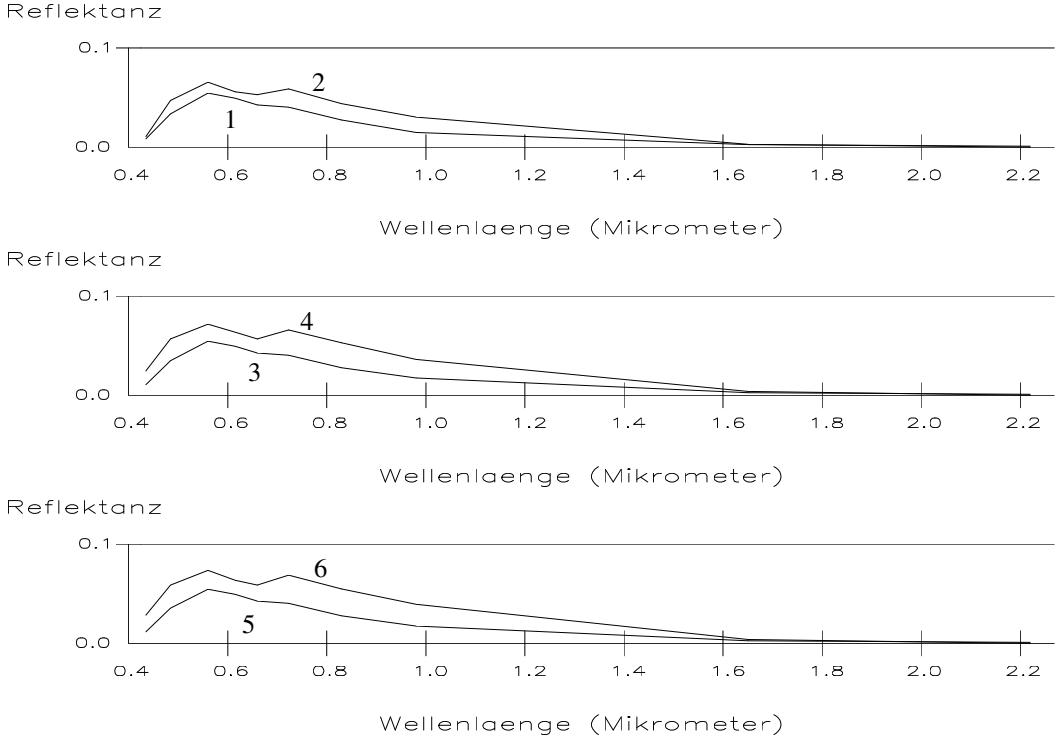


Abb.20 Reflektanzspektren des Sees (Abb.39) bei „300m und 1800m, 1991“ unter Variation des Parameters „Sichtweite“

1: Sichtweite = 15 km, 300 m 2: Sichtweite = 15 km, 1800 m
3: Sichtweite = 25 km, 300 m 4: Sichtweite = 25 km, 1800 m
5: Sichtweite = 35 km, 300 m 6: Sichtweite = 35 km, 1800 m

Bei der Betrachtung der Spektren fällt auf, daß die Übereinstimmung der Spektren aus Bildern unterschiedlicher Flughöhen bei allen gewählten Sichtweiten recht gut ist. Die geringen Auswirkungen der Sichtweite auf die Reflektanzen begründen sich dadurch, daß die Änderungen der Atmosphäreneinflüsse bei den niedrigen Aufnahmehöhen und den recht guten Sichtweiten klein sind. Dies wird auch daran deutlich, daß die Unterschiede der Reflektanzen zwischen den Sichtweiten „15 km“ und „25 km“ geringfügig größer sind als zwischen „25 km“ und „35 km“. In Tabelle 9 sind beispielhaft die Reflektanzen für das „Dach0“ aufgeführt.

Tabelle 9 Reflektanzen des „Dach0, 1991“

Wellenlänge [µm]	Reflektanz in %					
	15 km, 300 m	15 km, 1800 m	25 km, 300 m	25 km, 1800 m	35 km, 300 m	35km, 1800 m
0,42 - 0,45	4,7 ± 1,0	3,3 ± 0,5	4,8 ± 0,9	4,6 ± 0,5	4,7 ± 0,9	4,9 ± 0,4
0,45 - 0,52	8,8 ± 0,4	7,8 ± 0,4	8,6 ± 0,3	8,6 ± 0,4	8,4 ± 0,3	8,9 ± 0,1
0,52 - 0,60	11,7 ± 0,4	10,6 ± 0,4	11,4 ± 0,4	11,0 ± 0,4	11,2 ± 0,4	11,2 ± 0,3
0,61 - 0,63	12,4 ± 0,4	10,9 ± 0,29	12,1 ± 0,4	11,2 ± 0,3	11,9 ± 0,4	11,2 ± 0,3
0,63 - 0,69	13,3 ± 0,5	11,6 ± 0,4	12,9 ± 0,5	11,9 ± 0,3	12,7 ± 0,4	11,9 ± 0,4
0,69 - 0,75	14,3 ± 0,5	14,4 ± 0,4	13,9 ± 0,5	14,4 ± 0,4	13,6 ± 0,5	14,3 ± 0,5
0,76 - 0,90	14,4 ± 0,4	15,0 ± 0,4	14,8 ± 0,4	15,0 ± 0,4	14,4 ± 0,4	15,0 ± 0,4
0,91 - 1,05	16,9 ± 0,5	16,4 ± 0,5	16,3 ± 0,5	15,6 ± 0,3	16,1 ± 0,5	15,9 ± 0,5
1.55 - 1.75	20,3 ± 0,9	19,9 ± 0,6	20,1 ± 1,0	19,7 ± 0,6	20,0± 0,9	19,5 ± 0,6
2,08 - 2,35	19,3 ± 0,4	17,8 ± 0,4	19,2 ± 0,4	17,8 ± 0,4	19,3 ± 0,4	17,8 ± 0,4
Die angegebenen Standardabweichungen sind durch die Größe der betrachteten Flächen (Anzahl der Pixel) gegeben.						

Die verhältnismäßig großen Abweichungen der Reflektanzen des „Sees“ (Abb.20) kommen dadurch zustande, daß bei den Aufnahmen aus „1800 m“ Mischpixel aus „See“ und „Vegetation“ vorkommen. Dies ist an den Maxima der Reflektanzen im Kanal 6 (0,69 - 0,75 µm) zu erkennen.

Zur genaueren Bestimmung des Sichtweitenparameters wurden für verschiedene Flächen die Abstände d (G. 37) bestimmt. Diese sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10 Vergleich der Reflektanzen für verschiedene Sichtweiten „1991“

„1991“	Abstand d in % zwischen „300 m“ und „1800 m“ für „Sichtweite“ VIS		
Objekt	VIS = 15 km	VIS = 25 km	VIS = 35 km
Dach0	8,0	**4,8**	5,0
Dach1	12,8	11,2	**10,6**
Dach4	**11,0**	11,2	12,2
Strasse3	9,6	**7,0**	7,8
Hof0	15,0	14,4	**13,8**
Vegetation0	**8,2**	11,4	12,0

Dabei ist festzustellen, daß es keine eindeutige Zuordnung einer optimalen Sichtweite gibt. Dies liegt vermutlich daran, daß die meisten Flächen, entgegen der Modellannahme, keine Lambert-Reflektoren sind und daß, durch die unterschiedlichen Auflösun-

gen, eine exakte geometrische Übereinstimmung der Flächen zwischen „300 m“ und „1800 m“ nicht gegeben ist. Auch an diesen Werten ist zu erkennen, daß die Unterschiede der Abstände zwischen „25 km“ und „35 km“ recht gering sind. Sie liegen innerhalb 15 Prozent, meist sogar unter zehn Prozent. In dieser Arbeit wurde für die Aufnahmen „1991“ die Sichtweite „25 km“ gewählt.

Die entsprechenden Reflektanzspektren für „1992“ sind in Abb.21, Abb.22 und Abb.23 dargestellt.

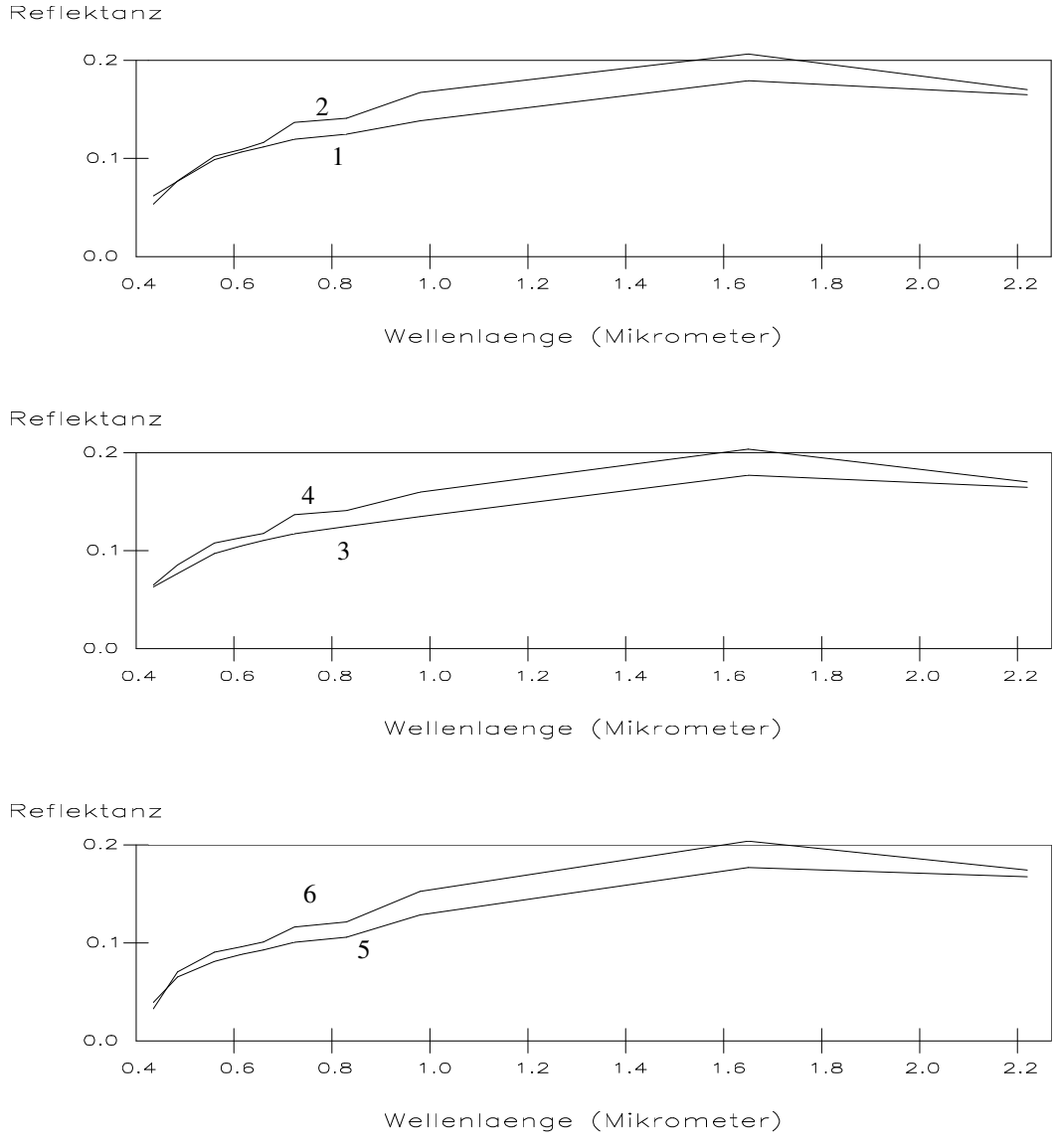
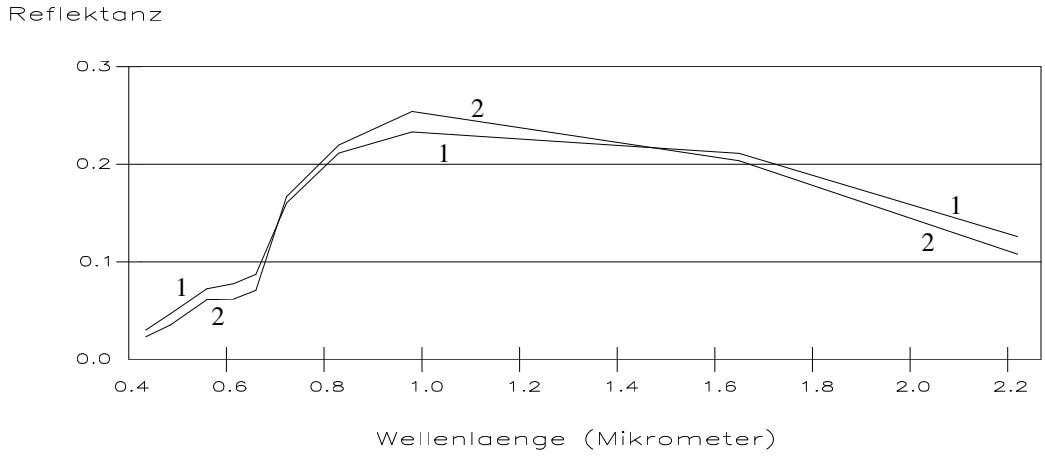
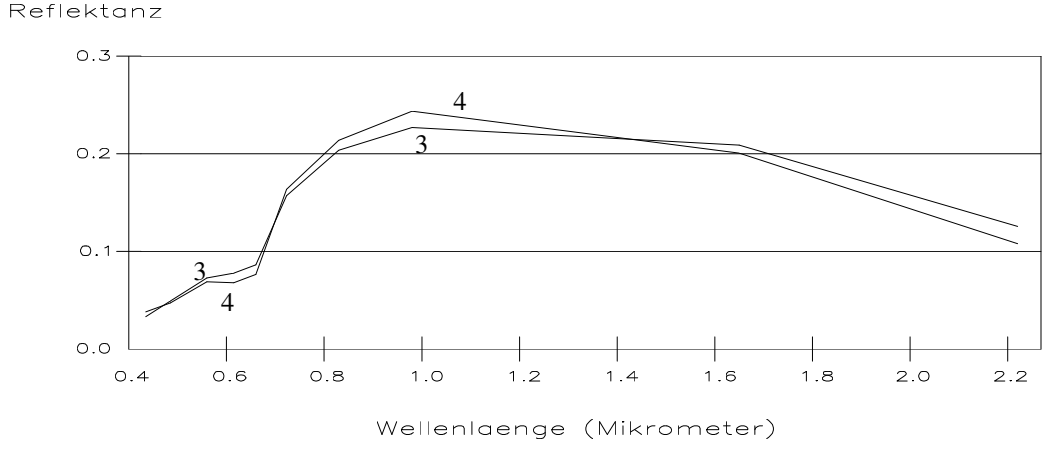


Abb.21 Reflektanzspektren „Dach0“ bei „300 m und 1800 m, 1992“ unter Variation des Parameters „Sichtweite“

1: Sichtweite = 15 km, 300 m
2: Sichtweite = 15 km, 1800 m
3: Sichtweite = 25 km, 300 m
4: Sichtweite = 25 km, 1800 m
5: Sichtweite = 35 km, 300 m
6: Sichtweite = 35 km, 1800 m





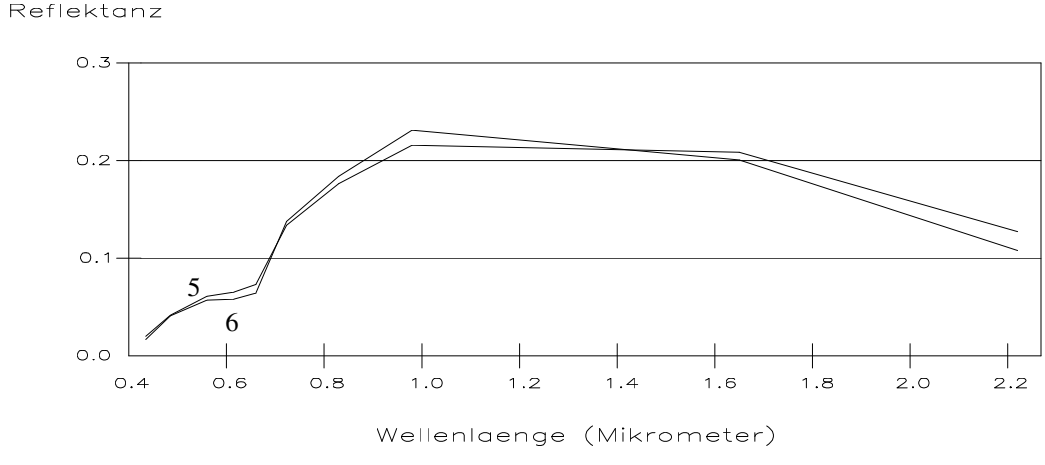


Abb.22 Reflektanzspektren „Vegetation0“ bei „300 m und 1800 m, 1992“ unter Variation des Parameters „Sichtweite“

1: Sichtweite = 15 km, 300 m
2: Sichtweite = 15 km, 1800 m
3: Sichtweite = 25 km, 300 m
4: Sichtweite = 25 km, 1800 m
5: Sichtweite = 35 km, 300 m
6: Sichtweite = 35 km, 1800 m

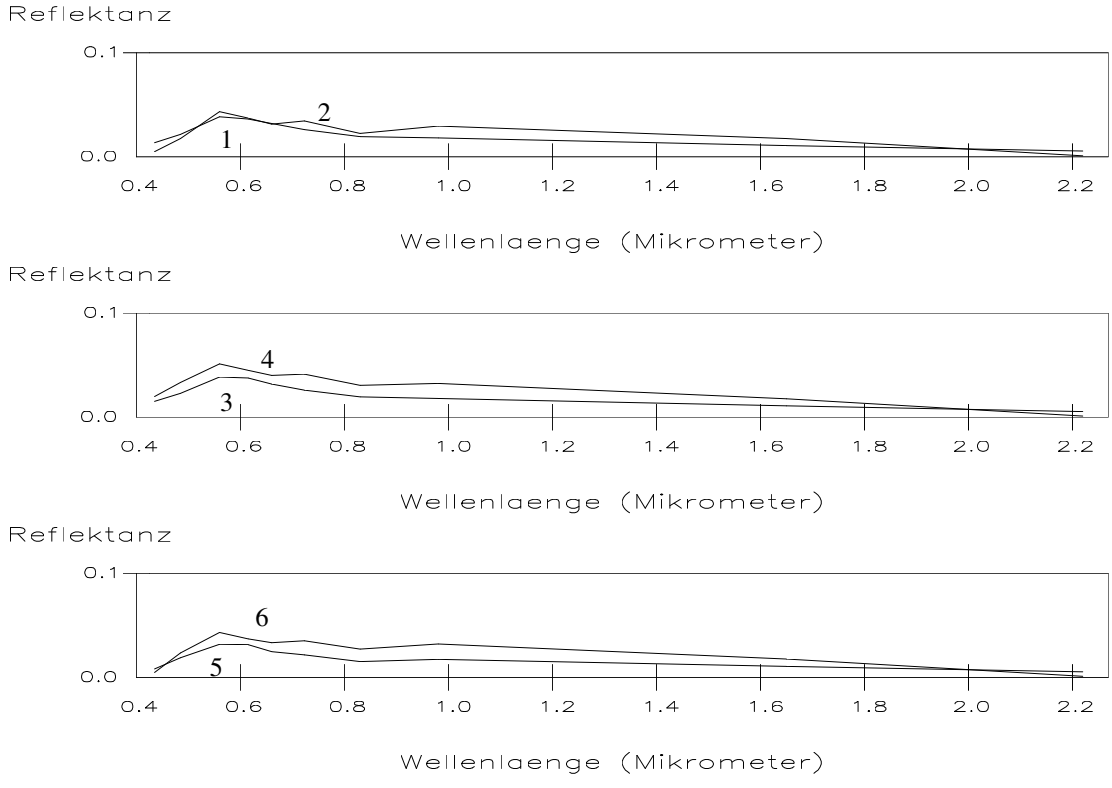


Abb.23 Reflektanzspektren „See“ bei „300m und 1800m, 1992“ unter Variation des Parameters „Sichtweite“

1: Sichtweite = 15 km, 300 m
2: Sichtweite = 15 km, 1800 m
3: Sichtweite = 25 km, 300 m
4: Sichtweite = 25 km, 1800 m
5: Sichtweite = 35 km, 300 m
6: Sichtweite = 35 km, 1800 m

Tabelle 11 Vergleich der Reflektanzen für verschiedene Sichtweiten „1992“

„1992“	Abstand d in % für Sichtweite „VIS“ in km:		
Objekt	VIS = 15	VIS = 25	VIS = 35
Dach0	**11,6**	12,0	12,3
Dach4	6,8	**4,6**	5,0
Straße3	14,4	**10,2**	11,9
Hof0	6,8	6,6	**6,1**
Hof1	7,6	**5**,0	5,9
Vegetation0	9,2	**7,2**	7,3

Aus Tabelle 11 wird ersichtlich, daß auch für die Aufnahmen von 1992 eine Sichtweite von 25 km die besten Übereinstimmungen liefert. Die Abweichungen des Abstandes liegen auch hier zwischen fünf und maximal 15 Prozent.

5.2.3 Überprüfung der Kalibrationswerte

Wie bereits in Abschnitt 3.3 erwähnt, standen Daten aus Labor- und Flugkalibrationen der DLR (Tabelle 5) zur Verfügung. Die Abweichungen der Kalibrationswerte zwischen

Labor- und Flugkalibration sind sehr groß. Zur quantitativen Überprüfung der Kalibrationswerte müßten Daten aus vergleichbaren Reflektanzmessungen am Boden [Milton 1987] während des Überfluges vorhanden sein. Die Bodenmessungen, die während der beiden Überflüge durchgeführt wurden, können wegen prinzipieller Meßfehler nicht verwendet werden. Somit ist es nicht möglich, quantitative Aussagen über die Kalibrationswerte zu machen. Qualitative Untersuchungen über den Verlauf der Reflektanzspektren zur Überprüfung der Kalibrationswerte konnten jedoch durchgeführt werden.

In den folgenden Abbildungen (Abb.24 bis Abb.27) sind die Reflektanzspektren für einige Objekte mit den „Labor- und Flugkalibrationswerten“ für den Überflug „1991“ dargestellt.

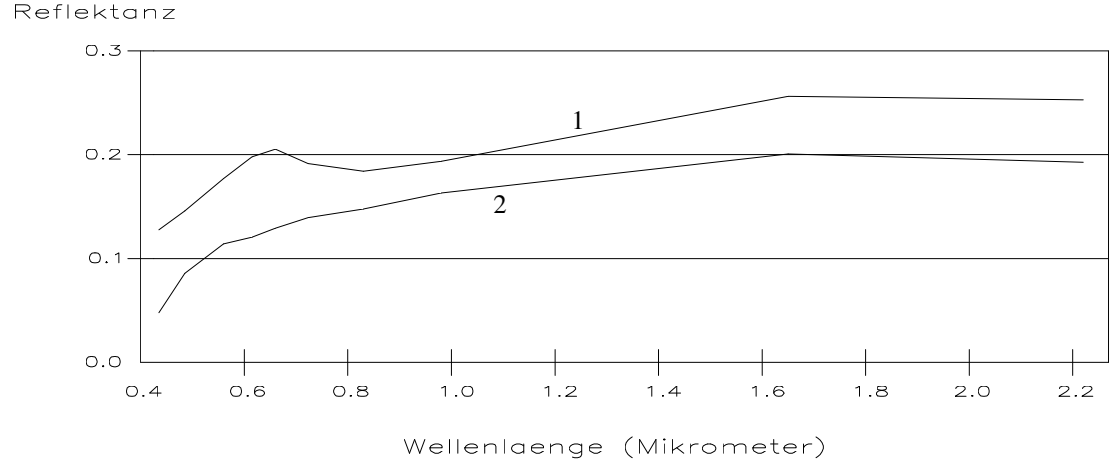


Abb.24 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte:„Dach0, 1991“

1: Flugkalibration
2: Laborkalibration

Abb.25 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte: „Hof0, 1991“

1: Flugkalibration
2: Laborkalibration

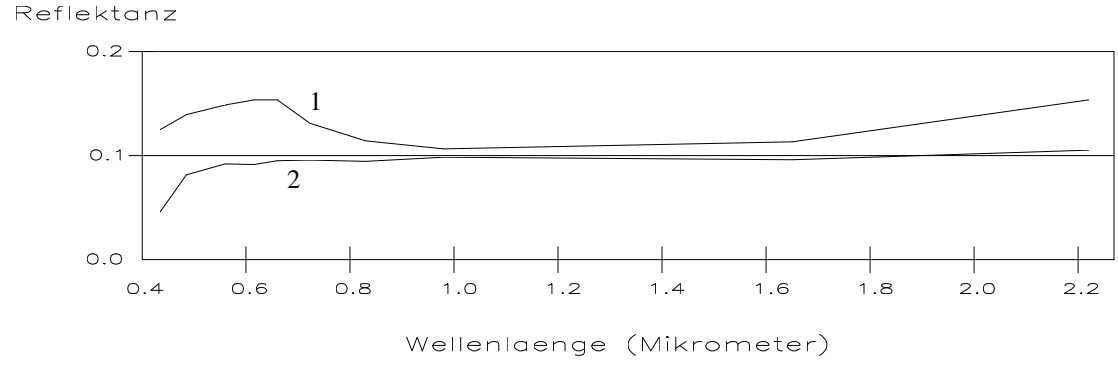


Abb.26 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte: „Strasse3, 1991“

1: Flugkalibration
2: Laborkalibration

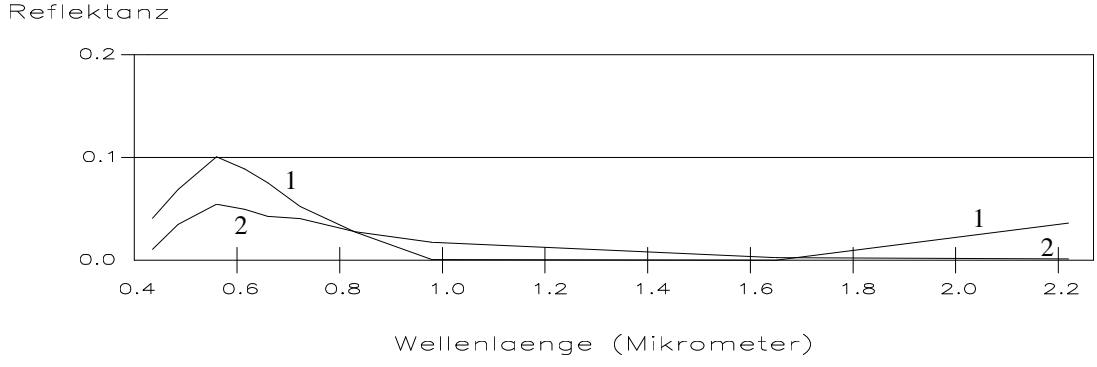


Abb.27 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte: „See, 1991“

1: Flugkalibration
2: Laborkalibration

Ein Vergleich mit den Spektren, die aus Reflektanzbildern mit den Werten der Laborkalibration erzeugt wurden, zeigt, daß die Reflektanzen mit der „Flugkalibration“ wesentlich größer sind. Diese quantitativen Unterschiede können allerdings ohne vergleichbare Bodenmessungen nicht beurteilt werden. Allerdings ist auffällig, daß die meisten Spektren (Dach0, Hof0, Strasse3) der „Flugkalibration“ in Kanal 5 ein Maximum haben. Diese Maxima sind aber völlig untypisch für die Reflektanzspektren der untersuchten Objekte. Das Spektrum des Sees weist eine recht hohe Reflektanz von 0,04 in Kanal 10 auf. Dies erscheint aufgrund der starken Strahlungsabsorption von Wasser im Infrarot unplausibel.

Auch bei den Spektren aus den Reflektanzbildern „1992“ können diese Unterschiede festgestellt werden. Diese sind in Abb.28 und Abb.29 beispielhaft für das „Dach0“ und den „See“ dargestellt.

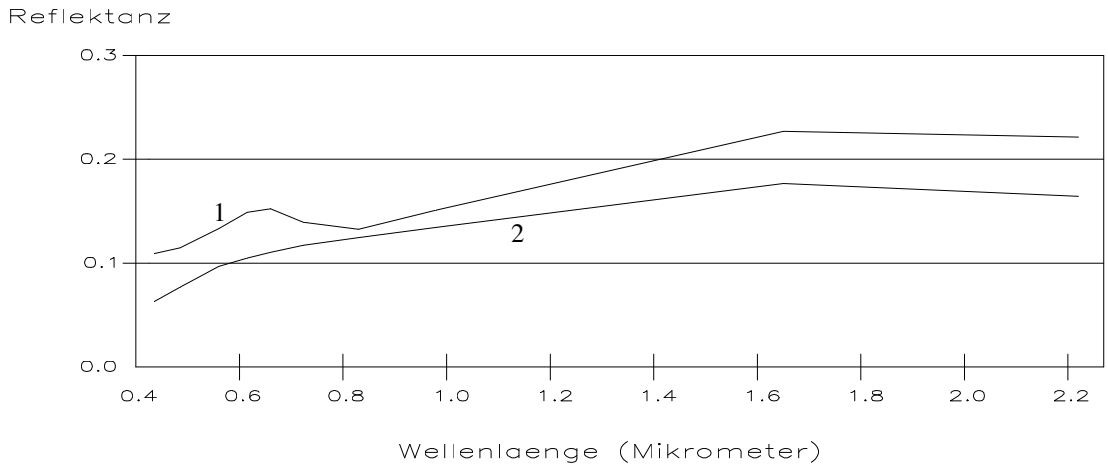


Abb.28 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte: „Dach0, 1992“

1: Flugkalibration
2: Laborkalibration

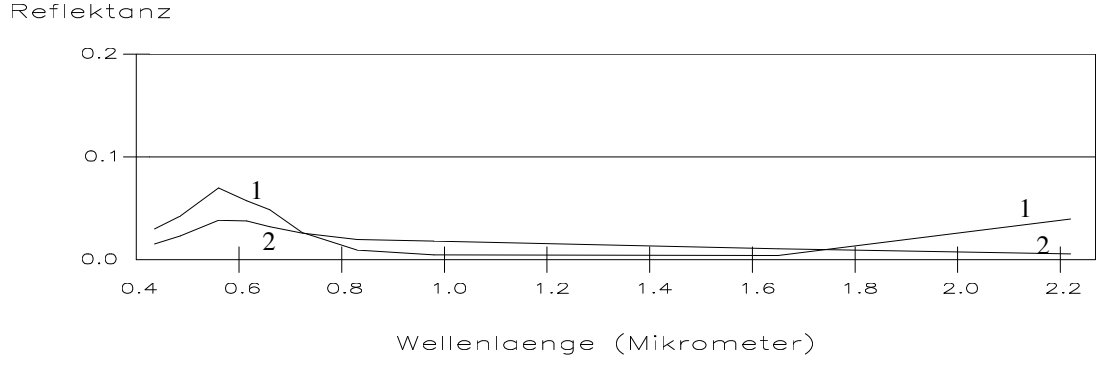


Abb.29 Reflektanzspektren für die verschiedenen Kalibrationswerte: „See, 1992“

1: Flugkalibration
2: Laborkalibration

Sämtliche Spektren, die mit den Werten aus den Laborkalibrationen gewonnen wurden, weisen einen wesentlich plausibleren Verlauf auf. Deshalb wurden die so erzeugten Reflektanzbilder für alle weiteren Untersuchungen eingesetzt.

5.3 Die Reflektanzbilder

Mit den Werten der Laborkalibration und einer Sichtweite von 25 km wurden dann, mittels des dazu erstellten Programms *ref-image*, Reflektanzbilder erzeugt. Um einen ersten Eindruckvon den Änderungen gegenüber den Originaldaten zu bekommen, ist es interessant, die entsprechenden Farbkompositenbilder zu vergleichen. Farbkompositbilder werden erzeugt, indem die Grauwerte der Kanäle im roten, grünen und blauen Bereich entsprechend des RGB-Farbmodells kombiniert werden. Die visuellen Unterschiede zwischen den Originalaufnahmen und den Reflektanzbildern sind an den Farbkompositbildern der Szene „Industriegebiet 1991“ (Bild 1 und Bild 2) recht deutlich zu erkennen.

Beim Vergleich der Bilder fällt besonders auf, daß das korrigierte Bild (Bild 2) wesentlich farbneutraler ist. Dem unkorrigierten Bild (Bild 1) fehlen im wesentlichen die Grünanteile: demzufolge erscheint die Vegetation eher braun als grün. Dieser Farbstich ist auch an den Dächern und Straßen zu erkennen. Allerdings muß betont werden, daß die Qualität des Bildes aus den Originaldaten durch einfache Bildverbesserungsverfahren (z.B. Histogrammangleich) wesentlich gesteigert werden kann. Die Reflektanzbilder hingegen haben den Vorteil, daß sie physikalische Größen repräsentieren. Deshalb sind bei ihnen keine statistischen Anpassungen zwischen den verschiedenen Kanälen eines Kompositbildes nötig (dies wäre sogar eine Verfälschung).

In Bild 3 und Bild 4 sind die, einer IR-Fotographie entsprechenden, IR-Farbkompositbilder für „1991“ und“1992“ dargestellt.

Photographische IR-Aufnahmen sowie IR-Kompositbilder eignen sich besonders gut zum Erkennen und Interpretieren von Vegetations- und Wasserflächen. Sie werden deshalb häufig in den Bereichen Umweltplanung, Städtebau [Gunßer 1993] und Regionalplanung eingesetzt.

Auf einen Vergleich mit einem IR-Kompositenbild aus den Originaldaten wird verzichtet, da das Auge ja keinen Bezug zur „IR-Realität“ hat.

5.4 Multitemporaler Vergleich

Anhand der so erzeugten Reflektanzbilder wurde nun untersucht, in wieweit die Reflektanzspektren für bestimmte Objekte aus zeitlich unterschiedlichen Aufnahmen vergleichbar sind. Dabei wurden hauptsächlich künstliche Objekte wie Dächer, Straßen und Betonflächen gewählt, da die Reflektanzen von Vegetationsflächen - entsprechend dem Pflanzenwachstum in den unterschiedlichen Jahreszeiten - sehr stark variieren.

In Abb.30 sind die Grauwerte der Originaldaten und in den folgenden Abbildungen (Abb.31 bis Abb.36) die Reflektanzspektren einiger Objekte aus den Bildern von „1991“ und „1992“ und der Flughöhen „300 m“ und „1800 m“ dargestellt.

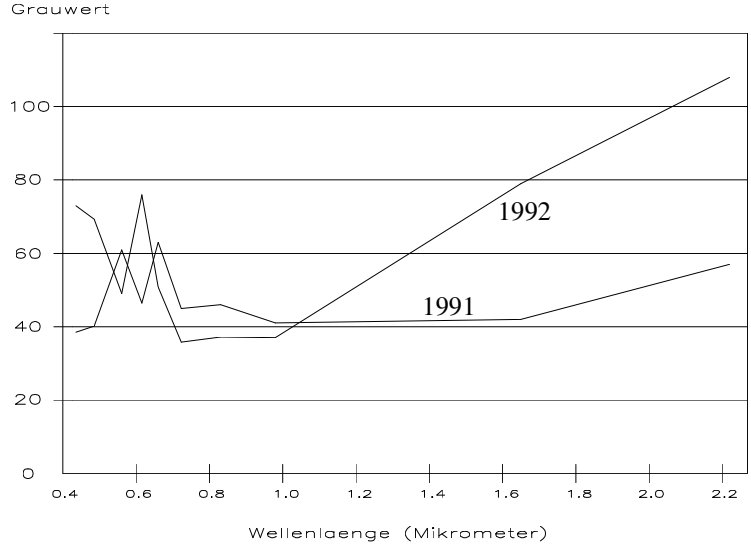


Abb.30 Originale Grauwerte „Dach0, 1991 und 1992“

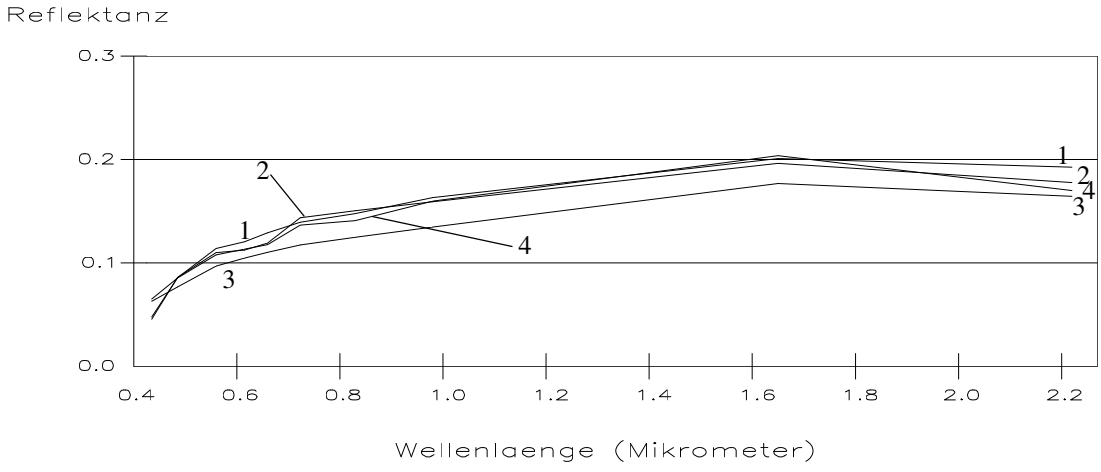


Abb.31 Multitemporaler Vergleich von „Dach0“

1: 300 m, 1991 2: 1800 m, 1991
3: 300 m, 1992 4: 1800 m, 1992

Abb.32 Multitemporaler Vergleich von „Hof0“

1: 300 m, 1991 2: 1800 m, 1991
3: 300 m, 1992 4: 1800 m, 1992

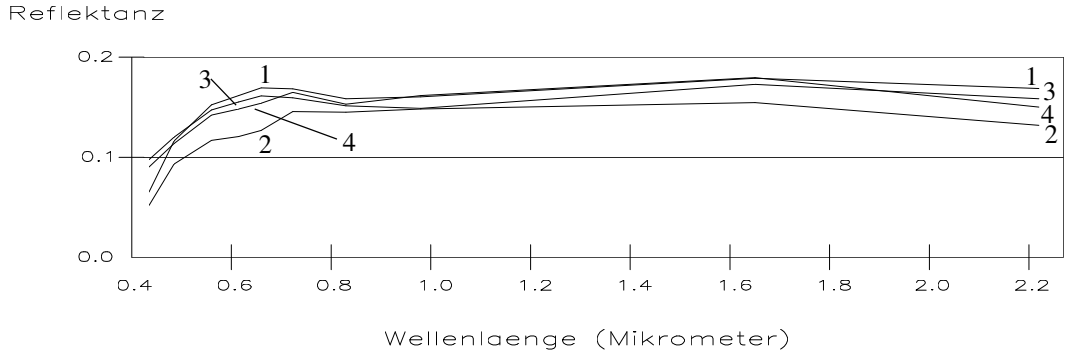


Abb.33 Multitemporaler Vergleich von „Hof1“

1: 300 m, 1991 2: 1800 m, 1991
3: 300 m, 1992 4: 1800 m, 1992

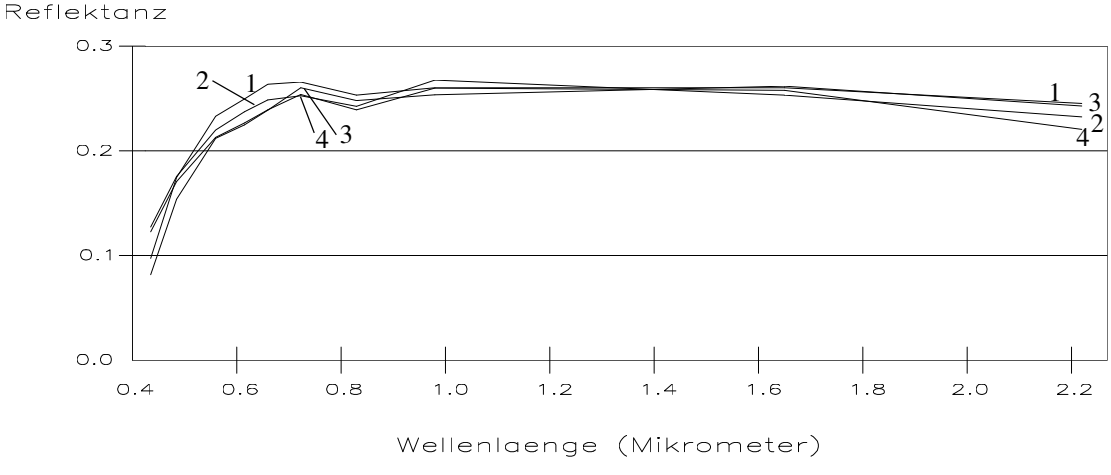


Abb.34 Multitemporaler Vergleich von „Vorfeld1“

1: 300 m, 1991 2: 1800 m, 1991
3: 300 m, 1992 4: 1800 m, 1992

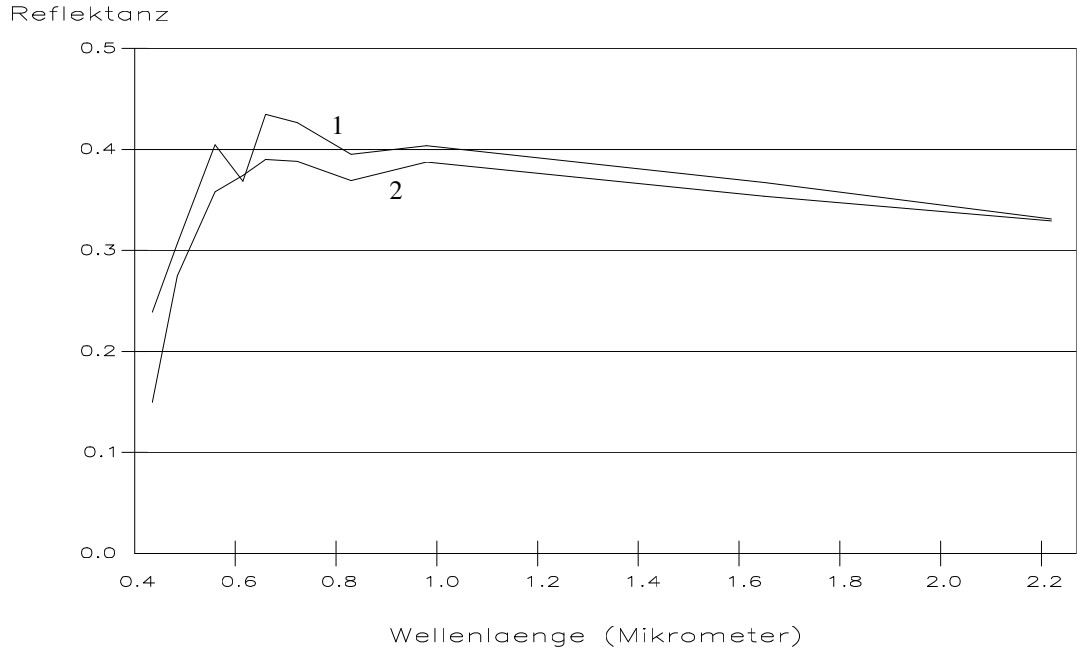


Abb.35 Multitemporaler Vergleich von „Dach2“

1: 300 m, 1991 2: 300 m, 1992

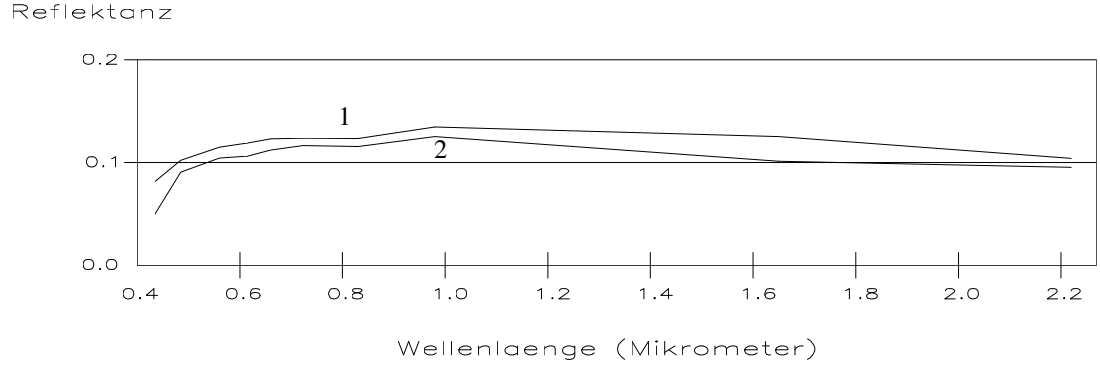


Abb.36 Multitemporaler Vergleich von „Dach4“

1: 300 m, 1991 2: 300 m, 1992

Am Beispiel „Dach0“ (Abb.30) ist deutlich zu erkennen, daß die originalen Bilddaten nicht miteinander verglichen werden können.

In Tabelle 12 bis Tabelle 14 sind die Reflektanzen für „Dach0“, „Hof1“ und „Hof0“ zum genaueren Vergleich angegeben. Die prozentuale Änderung bezieht sich dabei auf die Werte von 1991.

Tabelle 12 Spektrale Daten des Objekts „Dach0“

Dach0	Reflektanz in %		Änderung in %
Wellenlänge [µm]	August ’91, 300 m	April ’92, 300 m	
0,42 - 0,45	4,8 ± 0,9	6,3 ± 1,4	+ 32 ± 30
0,45 - 0,52	8,6 ± 0,3	7,7 ± 0,3	- 11 ± 5
0,52 - 0,60	11,4 ± 0,4	9,7 ± 0,3	- 15 ± 5
0,61 - 0,63	12,1 ± 0,4	10,5 ± 0,4	- 13 ± 5
0,63 - 0,69	12,9 ± 0,5	11,0 ± 0,4	- 17 ± 5
0,69 - 0,75	13,9 ± 0,5	11,7 ± 0,3	- 19 ± 4
0,76 - 0,90	14,8 ± 0,4	12,5 ± 0,4	- 19 ± 4
0,91 - 1,05	16,3 ± 0,5	13,5 ± 0,5	- 21 ± 5
1.55 - 1.75	20,1 ± 0,9	17,7 ± 0,8	- 14 ± 6
2,08 - 2,35	19,2 ± 0,4	16,4 ± 0,6	- 17 ± 4

Tabelle 13 Spektrale Daten des Objekts „Hof1“

Hof1	Reflektanz in %		Änderung in %
Wellenlänge [µm]	August ’91, 300 m	April ’92, 300 m	
0,42 - 0,45	6,5 ± 0,87	9,8 ± 1,38	+ 49 ± 20
0,45 - 0,52	11,6 ± 0,38	12,0 ± 0,39	+ 3 ± 4
0,52 - 0,60	15,2 ± 0,35	14,7 ± 0,34	- 3 ± 3
0,61 - 0,63	16,1 ± 0,39	15,5 ± 0,34	- 5 ± 3
0,63 - 0,69	16,9 ± 0,39	16,1 ± 0,34	- 5 ± 3
0,69 - 0,75	16,8 ± 0,31	15,9 ± 0,34	- 5 ± 3
0,76 - 0,90	15,8 ± 0,25	15,1 ± 0,32	- 5 ± 3
0,91 - 1,05	16,0 ± 0,40	14,9 ± 0,36	- 7 ± 4
1.55 - 1.75	17,9 ± 0,80	17,3 ± 0,71	- 4 ± 6
2,08 - 2,35	16,9 ± 0,47	15,8 ± 0,50	- 6 ± 4

Tabelle 14 Spektrale Daten des Objekts „Hof0“

Hof0	Reflektanz in %		Änderung in %
Wellenlänge [µm]	August ’91, 300 m	April ’92, 300 m	
0,42 - 0,45	9,7 ± 1,0	13,5 ± 1,3	+ 39 ± 14
0,45 - 0,52	17,4 ± 0,4	16,5 ± 0,4	- 5 ± 3
0,52 - 0,60	21,6 ± 0,3	19,4 ± 0,5	- 10 ± 3
0,61 - 0,63	22,7 ± 0,4	20,4 ± 0,5	- 10 ± 3
0,63 - 0,69	24,3 ± 0,4	21,5 ± 0,5	- 12 ± 3
0,69 - 0,75	25,1 ± 0,4	22,1 ± 0,6	- 12 ± 3
0,76 - 0,90	25,1 ± 0,5	21,3 ± 0,6	- 15 ± 3
0,91 - 1,05	26,4 ± 0,6	22,2 ± 0,7	- 16 ± 4
1.55 - 1.75	30,4 ± 1,1	26,4 ± 1,0	- 13 ± 5
2,08 - 2,35	26,6 ± 0,8	22,9 ± 0,7	- 14 ± 4

Die Reflektanzen im Kanal 1 weisen sehr große Abweichungen (30% - 50%) zwischen den beiden Aufnahmen „1991, 300 m“ und „1992, 300 m“ auf. Dies läßt sich nur durch fehlerhafte Kalibrationwerte erklären. Der qualitative Verlauf der entsprechenden Spektren deutet darauf hin, daß die Reflektanzen in den Aufnahmen von „1991“ für Kanal 1 zu niedrig sind. Die Abweichungen der Reflektanzen in den anderen Kanälen liegen zwischen fünf und zwanzig Prozent.

Zur genaueren Überprüfung der multitemporalen Reflektanzen wurde der Abstand d aus Gleichung (G. 37) bestimmt (Tabelle 15). Dabei wurden die Reflektanzen des Kanals 1 wegen der oben genannten Probleme nicht berücksichtigt.

Tabelle 15 Vergleich der Reflektanzen zwischen „1991“ und „1992“

	Abstand d in %			
Objekt	„300 m ’91“ - „300 m ’92“	„1800 m ’91“- „1800 m ’92“	„300 m ’91“ - „1800 m ’92“	„1800 m ’91“ - „300 m ’92“
Dach0	15,7	3,8	6,5	4,9
Dach4	10,9	2,8	12,8	5,8
Hof0	13,6	8,7	7,8	6,7
Hof1	5,0	14,9	6,4	16,9
Vegetation0	34,6	18,9	28,0	25,7
Strasse3	11,9	5,5	8,0	11,3
Vorfeld0	22,2	22,4	24,0	21,0
Vorfeld1	4,5	4,4	6,9	5,0
Hangar0	20,8	15,1	15,3	18,0
Hangar1	14,7	10,8	14,1	12,6

Bei den meisten Objekten sind die Übereinstimmungen der Spektren recht gut. Bei „Dach0“ und „Hof0“ fällt auf, daß die größten Abweichungen zwischen „300 m ’91“ und „300 m ’92“ auftreten. Ansonsten sind die Abstände in einer Größenordnung von fünf Prozent. Große Abstände treten bei „Vegetation0“ und „Vorfeld0“ auf. Bei der Vegetationsfläche liegt dies an dem jahreszeitlich bedingtem Wachstumsunterschied. Das Vorfeld0 ist, vermutlich durch Reifenabrieb und Abgase, wesentlich dunkler geworden.

Ansonsten betragen die Abstände etwa fünf bis fünfzehn Prozent. Die unterschiedlichen Abstände sind wohl meist auf schlechte Lambert-Eigenschaften oder geneigte Flächen zurückzuführen.

5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Vergleiche der Reflektanzspektren von gleichen Flächen aus unterschiedlichen Aufnahmen haben gezeigt, daß sie gut übereinstimmen. Die Abweichung zwischen Aufnahmen aus verschiedenen Höhen des selben Jahres und denen aus unterschiedlichen Jahren liegen in der gleichen Größenordnung (5 - 15%). Daraus kann geschlossen werden, daß die (unterschiedlichen) Kalibrationskoeffizienten der beiden Laborkalibrationen recht gut sind.

Bei der Auswertung und der Interpretation der Reflektanzspektren tritt das Problem auf, daß häufig genauere quantitative Aussagen nicht möglich sind. Dies liegt im wesentlichen an den folgenden Fehlerquellen :

- die meisten Flächen sind keine Lambert-Reflektoren,
- bei geneigten Flächen (z.B. Dächer) werden die dadurch geänderten Beleuchtungsverhältnisse nicht berücksichtigt,
- Genauigkeit der Sensorkalibration,

- Genauigkeit des Modells *SENSAT-4*.

Die Auswirkungen und Größenordnungen dieser Fehler können am einfachsten bestimmt werden, wenn zeitgleich mit der Überfliegung radiometrische Bodenmessungen durchgeführt werden.

6 Multispektrale Klassifikation auf Reflektanzbildern

Die Klassifikation multispektraler Bilder, d.h. die Zuordnung von Bildpunkten zu vorgegebenen Objektklassen, ist ein wichtiger Bestandteil einer automatisierten Bildauswertung.

Nachdem im letzten Kapitel für einige ausgewählte Objekte gezeigt wurde, daß deren Reflektanzpektren aus unterschiedlichen Aufnahmen vergleichbar sind, wird nun eine multitemporale multispektrale Klassifikation mit einmalig bestimmten spektralen Objektklassen durchgeführt.

6.1 Grundlagen der multispektralen Klassifikation

Ziel der multispektralen Klassifikation ist, jedes Pixel eines mehrkanaligen digitalen Bildes einer bestimmten Objektklasse zuzuordnen. Werden die Objektklassen bei der Klassifikation vorgegeben, so spricht man von überwachter Klassifikation. Die Klassifikation beruht auf Verfahren der Mustererkennung [Duda & Hart 1973]. Die Muster sind dabei die Elemente der Pixelvektoren. In Abb.37 sind die Endpunkte der Pixelvektoren für den einfachen Fall von zwei Kanälen und drei Flächen, die den Objekten Vegetation, Dach und See entsprechen, dargestellt.

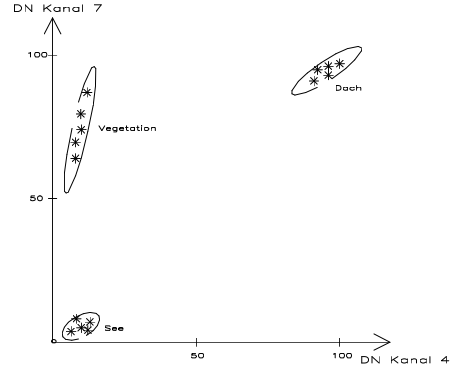


Abb.37 Darstellung von Vegetation, Wasser und Asphalt im zweidimensionalen Merkmalsraum für die Kanäle 4 und 7 des Daedalus AADS 1268

Jeder Punkt in dieser Darstellung entspricht einem Pixel in den Bilddaten.

Die drei Objekte werden aufgrund ihrer inhomogenen Reflexionseigenschaften nicht nur durch je einen Punkt, sondern durch Punkthaufen repräsentiert. Lassen sich nun die Punkthaufen, wie in diesem Beispiel, voneinander abgrenzen, so können diese Bereiche als Prototypen für Objektklassen dienen. Die Referenzflächen dieser bekannten Prototypen werden Trainingsgebiete genannt. Alle Vektoren der Pixel des Bildes, die in einem dieser Bereiche enden, können somit eindeutig einer der Klassen zugeordnet werden. In der Praxis zeigt sich allerdings, daß die Klassen im Merkmalsraum häufig sehr eng beieinander liegen, und somit eine eindeutige Zuordnung sehr schwierig wird. Die Zuordnung der Vektoren zu Klassen kann durch verschiedene Entscheidungskriterien vorgenommen werden. Am gebräuchlichsten sind *Minimum Distance* Verfahren (Verfahren der nächsten Nachbarschaft) und *Maximum Likelihood* Verfahren (Verfahren der

größten Wahrscheinlichkeit). Bei dem Minimum Distance Verfahren wird für jeden Vektor der Abstand zu allen vorgegebenen Klassenzentren bestimmt. Der Klasse mit dem kürzesten Abstand wird das Pixel dann zugeordnet. Bei dem Maximum Likelihood Verfahren werden, mittels statistischer Größen, die aus den vorgegeben Trainingsgebieten bestimmt werden, die Wahrscheinlichkeiten berechnet, mit der ein Pixelvektor einer Klasse angehört. Dementsprechend wird das Pixel der Klasse mit der größten Wahrscheinlichkeit zugeordnet. Dieses Verfahren wurde in dieser Arbeit zur Klassifikation eingesetzt und wird deshalb im folgenden etwas genauer beschrieben.

6.1.1 Maximum Likelihood Klassifikation

Gegeben seien M Spektralklassen ω_i

$$\omega_i \qquad i = 1,...,M \quad M = \text{Anzahl der Klassen} \tag{G. 38}$$

und die dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten $p(\omega_i | \vec{x})$, daß ein Pixel mit dem Vektor $\vec{x}$ zu einer Klasse ω_i gehört.

Die Bedingung für eine Klassifikation ist dementsprechend

$$\vec{x} \in \omega_i, \text{ falls } p(\omega_i | \vec{x}) > p(\omega_j | \vec{x}) \text{ für alle } j \neq i \,. \tag{G. 39}$$

Die Wahrscheinlichkeit $p(\omega_i | \vec{x})$ ist allerdings unbekannt. Dieses Problem kann gelöst werden, wenn die Wahrscheinlichkeit $p(\vec{x} | \omega_i)$ eine Klasse ω_i am Ort $\vec{x}$ zu finden, vorgegeben wird. Dies kann durch die Vorgabe von Trainingsgebieten, aus denen dann die nötigen N-dimensionalen Daten (Trainingsdaten) bestimmt werden, geschehen. Zwischen $p(\omega_i | \vec{x})$ und der vorhandenen Wahrscheinlichkeit $p(\vec{x} | \omega_i)$ gilt folgende Beziehung:

$$p(\omega_i | \vec{x}) = \frac{p(\vec{x} | \omega_i)\, p(\omega_i)}{p(\vec{x})} \,. \tag{G. 40}$$

Dabei ist $p(\omega_i)$ die Wahrscheinlichkeit, daß die Klasse ω_i im Bild enthalten ist und $p(\vec{x})$ die Wahrscheinlichkeit, am Ort $\vec{x}$ ein Pixel irgendeiner vorgegebenen Klasse ω_i zu finden (dies ist im weiteren nicht wichtig, da $p(\vec{x})$ für alle Klassen gleich ist). Die Klassifikationsregel kann nun geschrieben werden als

$$\vec{x} \in \omega_i, \text{ falls } p(\vec{x} | \omega_i)\, p(\omega_i) > p(\vec{x} | \omega_j)\, p(\omega_j) \text{ für alle } j \neq i \tag{G. 41}$$

oder, wenn die Funktion

$$g_i(\vec{x}) = \ln \{ p(\vec{x} | \omega_i)\, p(\omega_i) \} = \ln p(\vec{x} | \omega_i) + \ln p(\omega_i) \tag{G. 42}$$

eingeführt wird, als

$$\vec{x} \in \omega_i, \text{ falls } g_i(\vec{x}) > g_j(\vec{x}) \quad \text{für alle } j \neq i \,. \tag{G. 43}$$

Wird nun angenommen, daß die Verteilung der Wahrscheinlichkeiten einer N-dimensionalen Normalverteilung (Gauß-Verteilung) unterliegen[1], ergibt sich für die normalverteilte Wahrscheinlichkeit

$$p(\vec{x}|\,\omega_i) = (2\pi)^{-N/2}\left|\Sigma_i\right|^{-1/2}\exp\{-\frac{1}{2}(\vec{x}-\vec{m}_i)^t\,\Sigma_i^{-1}(\vec{x}-\vec{m}_i)\}, \quad \text{(G. 44)}$$

wobei m_i der Mittelwertvektor und Σ_i die Kovarianzmatrix der Daten der Klasse ω_i sind. Die Kovarianzmatrix Σ_i, die die Streuung der Pixelvektoren um dem mittleren Pixelvektor beschreibt, ist gegeben durch

$$\Sigma_i = \frac{1}{K-1}\sum_{j=1}^{K}(\vec{x}_j-\vec{m})\,(\vec{x}_j-\vec{m})^t. \quad \text{(G. 45)}$$

Für den eindimensionalen Fall läßt sich Gleichung (G. 44) recht einfach darstellen als

$$p(x|\,\omega) = (2\pi)^{-1/2}\sigma^{-1}\exp\{-\frac{1}{2}(x-m)^2/\sigma^2\}, \quad \text{(G. 46)}$$

wobei x die eindimensionale Variable im Merkmalsraum, m der Mittelwert von x und σ die Standardabweichung ist. Das Quadrat der Standardabweichung σ^2, auch Varianz genannt, ist gegeben durch:

$$\sigma^2 = \frac{1}{q-1}\sum_{j=1}^{q}(x_j-m), \quad \text{(G. 47)}$$

wobei q der Anzahl der Pixel der Klasse ω entspricht.

Die normalverteilte Wahrscheinlichkeit $p(x|\,\omega)$ ist in Abb.38 für den eindimensionalen Fall beispielhaft dargestellt.

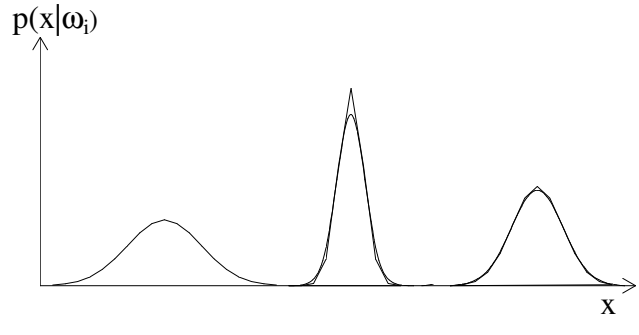


Abb.38 Eindimensionale Normalverteilung $p(x|\,\omega_i)$ für drei verschiedene Spektralklassen ω_i. Die Breite der Normalverteilung ist durch die Varianz bedingt.

Aus Gleichung (G. 42) folgt nun für den N-dimensionalen Fall

$$g_i(x) = \ln p(\omega_i) - \frac{1}{2}\ln\left|\Sigma_i\right| - \frac{1}{2}(\vec{x}-\vec{m}_i)^t\,\Sigma_i^{-1}(\vec{x}-\vec{m}_i), \quad \text{(G. 48)}$$

dabei wurde der konstante Vorfaktor $\frac{N}{2}\ln 2\pi$, der für alle g_i gleich ist, weggelassen.

1. Die Einführung einer Normalverteilung ist nur eine Annahme, die im folgendem zu mathematischen Vereinfachungen führt. Sie ist keine beweisbare Eigenschaft natürlicher spektraler Klassen.

Ist die Wahrscheinlichkeit $p(\omega_i)$, daß die Klasse ω_i im Bild enthalten ist unbekannt, wird häufig für alle Klassen die gleiche Wahrscheinlichkeit $p(\omega_i)$ angenommen, so daß sich (G. 48) vereinfachen läßt zu

$$g_i(x) = -\ln|\Sigma_i| - (\vec{x} - \vec{m}_i)^t \Sigma_i^{-1} (\vec{x} - \vec{m}_i) . \qquad \text{(G. 49)}$$

Das in dieser Arbeit eingesetzte Maximum Likelihood Verfahren wurde, von Gleichung (G. 49) ausgehend, von Christian Drewniok (aus der Gruppe OSCAR) implementiert.

6.2 Anwendung der Maximum Likelihood Klassifikation

Für die Durchführung einer überwachten Klassifikation sind im wesentlichen folgende fünf Schritte notwendig:

- Auswahl von Klassen, die klassifiziert werden sollen,
- Bestimmung von Referenzflächen für diese Klassen (Trainingsgebiete), z.B. durch Ortsbesichtigung, Farbkompositbilder, Karten, usw.,
- Berechnung der benötigten statistischen Größen (Σ_i, $\vec{m}_i$) (Trainingsdaten) der entsprechenden Trainingsgebiete,
- Durchführung der Klassifizierung mit diesen Trainingsdaten,
- Graphische oder tabellarische Darstellung des Ergebnisses, z.B. Falschfarbendarstellung.

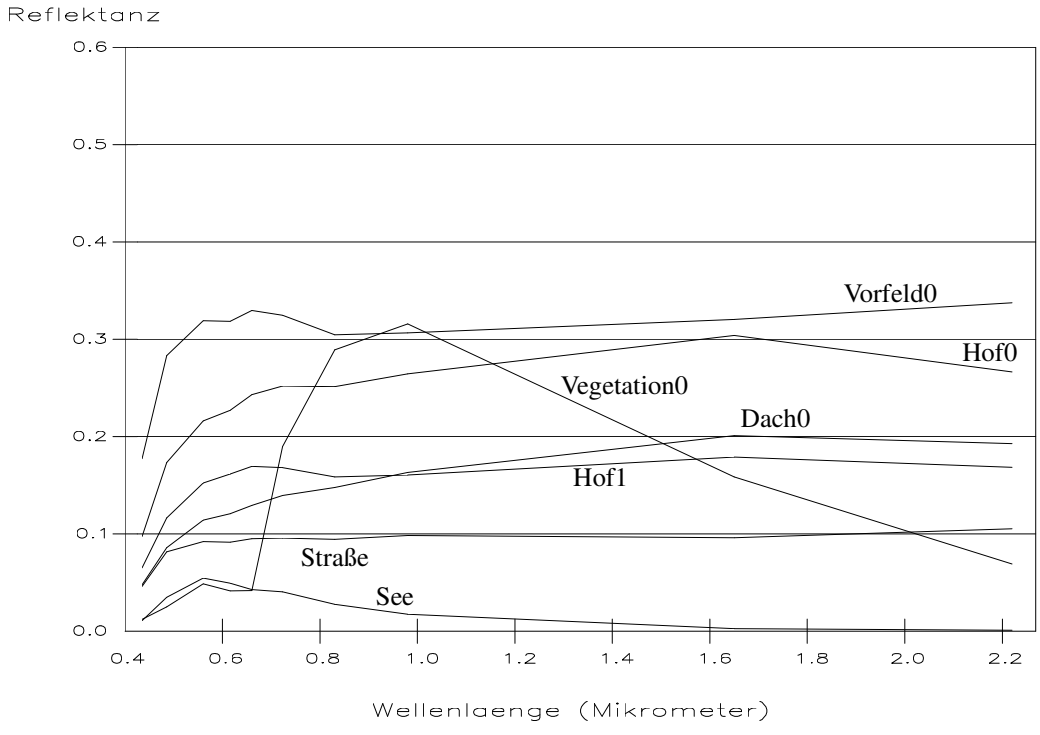
6.2.1 Auswahl der Trainingsgebiete

Anhand der Reflektanzbilder der Szenen „Industriegebiet“ und „Flughafen“ von August 1991, der daraus erzeugten Farbkompositbilder und Kontaktabzügen der Luftbildnegative, wurden Trainingsgebiete ausgewählt. Entsprechend den Zielen des Projektes wurde dabei vor allem Wert auf künstliche Objekte gelegt. Als natürliche Objekte wurden nur die Klassen „Vegetation“ und „See“ gewählt. Anfangs wurden 15 Trainingsgebiete ausgewählt. Es hat sich aber gezeigt, daß die spektralen Eigenschaften einiger Klassen sehr ähnlich waren und die Klassifikation deshalb keine besseren Ergebnisse liefert. Zur Überprüfung der Ähnlichkeit von Klassen wurde der Bhattacharyya-Abstand [Niemann 1983] (siehe Anhang 8.3) verwendet. Dementsprechend wurden nur noch Klassen verwendet, bei denen eine Unterscheidung sinnvoll schien. Besonders deutlich wurde dies bei Vergleichen zwischen den Klassen „Straße“ und „Dächer“. Da die Flachdächer häufig eine Oberfläche aus Bitumen haben, lassen sie sich teilweise recht schwer von Straßen mit Asphaltbelag unterscheiden.

In Bild 5 sind die Bezeichnungen der Objektklassen aufgeführt. Die dazugehörigen Trainingsgebiete sind in Abb.39 und Abb.40 eingezeichnet. Die Reflektanzspektren der Objektklassen sind in Abb.41 dargestellt. Die aus den Aufnahmen von 1991 aus 300 m Höhe gewonnenen Trainingsdaten wurden für alle durchgeführten Klassifikationen verwendet.

Abb.39 Trainingsgebiete „Industriegebiet 1991“
Grauwerte aus Kanal 5 (rot) des Reflektanzbildes

Abb.40 Trainingsgebiete „Flughafen 1991“
Grauwerte aus Kanal 5 (rot) des Reflektanzbildes



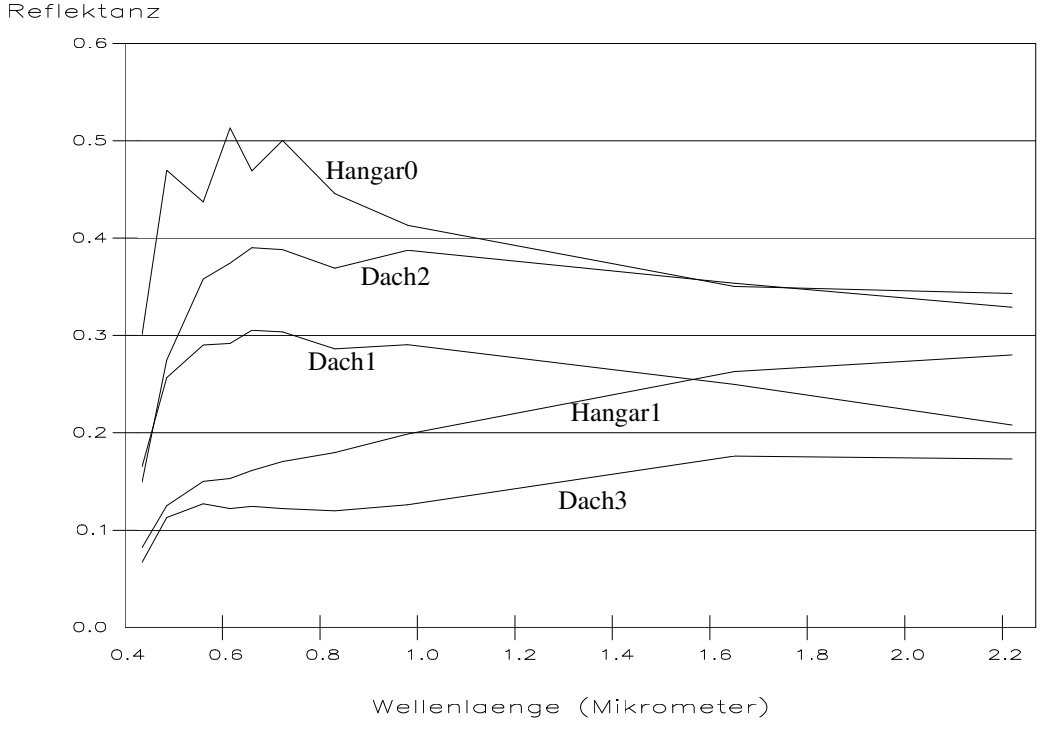


Abb.41 Reflektanzspektren der Objektklassen „1991“

In Tabelle 16 sind die Bhattacharyya-Abstände zwischen den verschiedenen Objektklassen aufgeführt.

Tabelle 16 Bhattacharyya-Abstände zwischen den Objektklassen

B	Straße	Veg	Erde	Dach0	Dach1	Dach2	Dach3	Hof0	Hof1	See	Vor-feld0	Han-gar0	Han-gar1
Straße	0	137	359	82	178	468	38	165	61	60	283	152	1417
Veg	137	0	86	196	421	921	263	552	278	128	634	307	5855
Erde	359	86	0	178	325	209	310	84	258	384	294	128	1008
Dach0	82	196	178	0	217	465	74	114	37	296	364	58	2416
Dach1	178	421	325	217	0	100	233	64	108	404	50	185	209
Dach2	468	921	209	465	100	0	960	124	674	1241	153	378	311
Dach3	38	263	310	74	233	960	0	209	93	236	246	116	3258
Hof0	165	552	84	114	64	124	209	0	83	602	108	78	1137
Hof1	61	278	258	37	108	674	93	83	0	315	204	97	1523
See	60	128	384	296	404	1241	236	602	315	0	516	376	8297
Vorfeld0	283	634	294	364	50	153	246	108	204	516	0	215	235
Hangar0	152	307	128	58	185	378	116	78	97	376	215	0	1637
Hangar1	1417	5855	1008	2416	209	311	3258	1137	1523	8297	235	1673	0

Am Beispiel der „Straße“ ist zu erkennen, daß die Abstände zu „Dach0“, „Dach3“, „Hof1“ und „See“ recht gering sind. Es kann deshalb nicht erstaunen, wenn innerhalb dieser Klassen falsche Zuordnungen stattfinden werden.

6.2.2 Interpretation der Klassifikationsergebnisse für 1991

Mit den oben beschriebenen Objektklassen wurde die Klassifikation der Szenen „Industriegebiet“ und Flughafen“ aus den Reflektanzbildern durchgeführt. Die Klassifikationsergebnisse werden als Falschfarbenbilder dargestellt. Die Farbzuordnung der einzelnen Klassen ist in Bild 5 abgebildet.

„Industriegebiet 1991“

Das Klassifikationsergebnis der Szene „Industriegebiet 1991, 300 m“ ist in Bild 6 dargestellt. Ein Vergleich mit den Farb- und IR- Kompositbildern (Bild 2 und Bild 3) zeigt, daß die Vegetation, aufgrund der sehr typischen spektralen Signatur (rote Flanke), sehr gut klassifiziert wurde. Dies gilt sogar für Vegetationsflächen, die im Schatten liegen (Markierung A und B). Der ganze See, der durch die geringe Tiefe recht starke Schwankungen der Reflektanzen aufweist, wurde richtig erkannt (das Trainingsgebiet bestand ja nur aus 10 x 10 Pixel). Allerdings wurden auch einige sehr dunkle Objekte wie das Hausdach (C) und die meisten Schatten als „See“ klassifiziert. Die Straßen (dunkelblau) wurden recht gut klassifiziert, es wurden aber auch, wie aufgrund der Ähnlichkeit erwartet (siehe Abschnitt 6.2.1), einige Dächer ganz oder teilweise als „Straße“ klassifiziert. Interessant ist, daß die von der Sonne abgewandten Seiten der Giebeldächer (D und E) den „Straßen“ zugeordnet wurden. Dies zeigt sehr deutlich, daß die Neigung von Objekten, die ja bei den Korrekturen nicht berücksichtigt wurde, einen recht großen Einfluß hat. Den beiden „Hof“- Klassen (gelb und braun) wurden vor allem die Gehwege und betonierten Höfe (vermutlich Pflastersteine), aber auch einige wenige Dächer (F, G, und H) zugeordnet. Nicht klassifiziert wurden hauptsächlich Objekte, die sich farblich

sehr von den vorgegebenen Klassen unterscheiden. Dazu gehören die verschiedenfarbigsten Autos, der orangefarbene Kran (I) und das mit roten Ziegeln gedeckte Dach (K). Sehr stark und teilweise spiegelnd reflektierende Objekte wurden ebenfalls häufig nicht klassifiziert oder den sehr hellen Klassen „Hangar0“ und „Dach2“ zugeordnet. Allerdings sind die Reflektanzen solcher Flächen so unterschiedlich, daß eine wesentlich bessere Zuordnung in entsprechende Klassen - ohne die Anzahl der Trainingsgebiete wesentlich zu erhöhen - kaum möglich sein wird.

„Flughafen 1991“

Das Klassifikationsergebnis der Flughafenszene „1991“ (Bild 7) bestätigt im wesentlichen die Aussagen über die Vegetationsflächen, Straßen und Dächer des „Industriegebiets“. Die nichtklassifizierten Flächen sind auch hier hauptsächlich die besonders hellen Flächen. Dies ist besonders deutlich an den Flugzeugen zu sehen. Wird eine helle Fläche wie z.B. der „Hangar0“ (rot) als Trainingsgebiet vorgegeben, ist es durchaus möglich - wie an den nebenstehenden Hangars zu erkennen - solche Objekte zu klassifizieren. Das Vorfeld wurde, entsprechend der Beläge, ziemlich gut in die Klassen „Vorfeld“, „Hof0“, „Hof1“ und „Straße“ eingeordnet. Entsprechendes gilt auch für den Bogen (L).

6.2.3 Vergleich der Klassifikationsergebnisse zwischen 1991 und 1992

Viel interessanter ist nun, mit den spektralen Daten der Trainingsgebiete von 1991 die entsprechenden Szenen von 1992 zu klassifizieren. Solch eine Klassifikation ist mit den Originaldaten, aufgrund der geänderten Aufnahmebedingungen wie Sonnenstand, Verstärkungsfaktoren des A/D-Wandlers usw., praktisch nicht möglich. In Bild 8 ist deutlich zu erkennen, daß die Ergebnisse dieser Klassifikation unbrauchbar sind: Der See und Schattengebiete wurde als „Straße“ und die restlichen Flächen fast nur als „Boden“ klassifiziert.

„Industriegebiet 1992“

Das Ergebnis einer Klassifikation auf den Reflektanzbildern der Szene „Industriegebiet 1992, 300 m“ zeigt Bild 9. Ein Vergleich mit dem Klassifikationsergebnis von „1991“ (Bild 6) zeigt eine recht gute Übereinstimmung. Die Wasserflächen, Straßen, Gehwege und Höfe wurden recht übereinstimmend klassifiziert. Die Vegetationsflächen wurden ebenfalls gut erkannt. Allerdings ist bei dieser Szene zu erkennen, daß einige Flächen, die „1991“ zusammenhängige Vegetationsgebiete (z.B. M) waren, recht viele unklassifizierte (weiße) Regionen enthalten. Dies liegt, wie ein Vergleich der IR - Kompositbilder (Bild 3 und Bild 4) zeigt, an dem jahreszeitlich bedigtem schwachen Pflanzenwuchs. Bei den Dächern kann festgestellt werden, daß auch sie im wesentlichen übereinstimmend klassifiziert wurden. Die größten Abweichungen treten in der Zuordnung der Klassen „Hof0“ und“Hof1“ auf den Dächern R und T auf. Die nichtklassifizierten Flächen des Daches N sind die Folge der Übersteuerung des Sensors an diesen Stellen.

„Flughafen 1992“

Auch die Klassifikation der Szene „Flughafen 1992“ (Bild 10) liefert recht gute Ergebnisse. Allerdings hat der Sensor während dieser Aufnahme noch häufiger übersteuert, so daß dementsprechend mehr Flächen nicht klassifiziert wurden. Dies wird besonders im Bereich des Flughafengebäudes (O) deutlich.

Besonders gute Übereinstimmungen sind im Bereich des Bogens (P), der beinahe Pixel für Pixel der Klassifizierung von „1991“ entspricht, und der Wege im Bereich der Hangars (Q) festzustellen. Die Änderungen im Bereich des Vorfeldes sind auf Verdunklungen - vermutlich durch Reifenabrieb und Abgase - zurückzuführen. Diese Änderungen sind besonders gut in den S/W - Luftbildern zu erkennen. Das als „Vegetation“ klassifizierte Gebiet (R), war „1991“ noch nicht begrünt.

6.2.4 Klassifikation der Aufnahmen aus 1800 m Höhe

Als nächstes wurden die entsprechenden Szenen der Aufnahmen aus 1800 m Höhe klassifiziert. Als Spektralklassen wurden ebenfalls die spektralen Klassen aus „Industriegebiet 1991, 300 m“ vorgegeben. Bei der Interpretation der Ergebnisse muß dabei natürlich berücksichtigt werden, daß diese Klassen nun nicht unbedingt die besten Prototypen für die etwa elffach größeren Bodenelemente sind. Die geringe Auflösung bewirkt nämlich, daß viele Mischpixel, für die keine geeigneten Trainingsgebiete vorhanden waren, entstehen. Bild 11 und Bild 12 zeigen dennoch recht gute Klassifikationsergebnisse für den „Flughafen“.

Die Flughafengebäude wurden recht gut und übereinstimmend klassifiziert. Lediglich der rechte Gebäudeteil wurde bei den 1800 m - Aufnahmen, gegenüber den 300 m-Aufnahmen, der anderen Hofklasse zugeordnet. Auch bei diesen Bildern sind die Unterschiede der Beläge des Vorfeldes deutlich zu erkennen. Entsprechendes gilt für die Vegetationsflächen (an der Stelle S ist die besonders deutlich).

6.3 Zusammenfassung

Die multitemporale Klassifikation auf Reflektanzbildern hat sehr ansprechende Ergebnisse geliefert. Dies trifft besonders auf Objekte zu, die verhältnismäßig gute Lambert-Reflektoren (Straße, Bitumendächer, Beton usw.) sind. Bei anderen, teilweise sogar spiegelnd reflektierenden, Objekten ist eine differenzierte multitemporale Klassifikation kaum möglich. Allerdings entsprechen fast alle nicht klassifizierten Gebiete diesen Objekten. Ein anderes Problem stellen geneigte Flächen dar. Durch die anderen geometrischen Bedingungen während der Aufnahme werden sie nicht richtig modelliert. Um diese Fälle bei der Erzeugung der Reflektanzbilder zu berücksichtigen, müßte die Geometrie (z.B. aus Digitalen Geländemodellen oder aus anderen detaillierteren 3D-Modellen) bekannt sein.

Diese Schwierigkeiten treten aber auch bei einer Klassifikation auf Originaldaten auf. Insofern ist dies keine Einschränkung für die Klassifikation auf Reflektanzbildern. Der große Vorteil der Reflektanzbilder liegt im einmaligen Bestimmen der Trainingsgebiete und -daten, da dieser Arbeitsschritt recht schwierig und zeitintensiv ist. Bei den Reflektanzbildern ist es sogar - unabhängig von speziellen Aufnahmen - prinzipiell möglich, eine Datenbank mit einmalig bestimmten Objektklassen zu erstellen. Dies ist eine wesentliche Erleichterung für die multitemporale Klassifikation.

7 Ausblick

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, daß multispektrale Reflektanzbilder die Möglichkeit bieten, Objekte aus unterschiedlichen Aufnahmen quantitativ zu vergleichen.

Dies ermöglicht eine überwachte multispektrale Klassifikation mit einmalig vorgegebenen Trainingsdaten. Dabei ist es nicht wesentlich, aus welchen Aufnahmen diese Daten bestimmt werden. Es bietet sich daher an, eine Datenbank mit den Trainingsdaten für verschiedene Klassen anzulegen. Der Vorteil dabei ist, daß dann nicht mehr für jede zu klassifizierende Szene die Trainingsgebiete und -daten neu bestimmt werden müssen.

Schwierigkeiten bei einer Klassifikation machen oft Objekte, deren spektrale Eigenschaften nur schlecht oder nicht zu unterscheiden sind (Beispiel: Bitumendächer und asphaltierte Straßen). Diese Objekte haben aber häufig unterschiedliche Strahlungstemperaturen. Somit können sie anhand der Bilddaten des Kanals im thermischen Infrarot möglicherweise genauer voneinander abgegrenzt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Differenzierung können wissensbasierte Ansätze, wie sie in der Gruppe OSCAR bearbeitet werden, liefern. Wird vereinfachend davon ausgegangen, daß Straßen lange schmale und Dächer verhältnismäßig kleine rechteckige Objekte sind, können sie durch ihre Geometrie unterschieden werden. Allerdings gibt es auch Asphaltflächen (z.B. Parkplätze), die mit diesem einfachen Ansatz nicht von Dächern abgegrenzt werden können.

Ein weiteres Problem stellen geneigte Objekte dar (z.B. Satteldächer). Sie werden durch die geänderte Beleuchtungs- und Aufnahmegeometrie nicht richtig modelliert. In der Arbeitsgruppe laufen Arbeiten, die sich mit einer nachträglichen Korrektur solcher Objekte (Anpassung an „als wären sie horizontal“) beschäftigen. Für diese Untersuchungen sind hochauflösende radiometrische Bodenmessungen an verschiedenen Dächern bei unterschiedlichen Sonnenständen geplant.

Die Tatsache, daß die spektralen Eigenschaften vieler Objekte durch die Modellannahme des Lambert-Reflektors nur unzureichend beschrieben werden, stellt ein weiteres Problem in der quantitativen Auswertung dar. Um die Winkelabhängigkeit der einfallenden und reflektierten Strahlung zu berücksichtigen, müßten die untersuchten Objekte und deren bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion bereits bekannt sein. Es gibt zwar Ansätze, diese Funktionen für einige Objekte (oft Vegetation) zu modellieren, doch ist der Aufwand für eine derartige Korrektur der Bilder sehr hoch.

Bei einer Überfliegung im Herbst 1994 sollen weitere Bilddaten für das Gebiet „Flughafen Nürnberg“ gewonnen werden. Damit können zeitliche Änderungen in den Bildern noch besser untersucht werden. Zusätzlich sind radiometrische Bodenmessungen geplant, um die Korrekturen quantitativ besser beurteilen zu können.

8 Anhang

8.1 Beschreibung der C-Programme

8.1.1 *sensat_input*

Das Programm *sensat_input* dient zur Erzeugung der benötigten Eingabedateien für die Programme *MODTRAN* und *SENSAT-4* für den flugzeuggestuetzten Daedalus AADS 1268 Scanner im reflektiven Wellenlängenbereich (Kanal 1 - 10).

Eingabeparameter:

Das Programm *sensat_input* benötigt folgende Eingaben auf Kommandoebene:

1. - o Name und Pfad der Ausgabedateien ohne Endungen
2. - r Name der Datei des Radiosondenprofils

Dabei ist zu beachten, dass alle Pfadangaben relativ zu dem *SENSAT-4* - Verzeichnis anzugeben sind. Die Dateiendungen werden automatisch erzeugt.

Vom Programm aus werden dann folgende Eingaben erwartet:

1.	Visibility:	Sichtweite in km (IVIS)
2.	Haze Model:	ländlich oder städtisch (IHAZE)
3.	Ground Altitude:	Höhe über NN in km (GNDAL)
4.	Sensor Altitude:	Flughöhe über NN in km (H1)
5.	Day of the Year:	laufender Tag (ab 01.01) (IDAY)
6.	Solar Azimuth:	Winkel in Grad (Osten = 90°) (PHISUN)
7.	Solar Zenith:	Winkel in Grad (THSUN)
8.	Flight Heading: (PHISEN)	Flugrichtung in Grad (O = 90°)
9.	Wavenumber Increment:	Schrittweite in 1/cm (≥ 5/cm)(IDV)

Die übrigen 45 benötigten Eingabeparameter werden durch *#define*-Anweisungen vorgegeben. Diese Vorgaben entsprechen den Standardbedingungen bei den beiden Überflügen. Die Variablen werden im einzelnen in [Richter 1991], [Richter 1992-2] und im Lowtran-Handbuch [ONTAR 1991] erklärt. Unter anderem wird das Atmosphärenmodell 7 ’Sommer in mittleren Breiten (45°N, Juli)’ verwendet. Die Variablen sind im Quelltext des Programms kurz beschrieben.

Ausgabedateien:

Die Fortran Programme *MODTRAN* und *SENSAT-4* benötigen als Eingabe die Dateien *mod.file* und *sen.file* im *SENSAT-4*-Verzeichnis. Diese Dateien enthalten die Namen und Pfade (relativ zum *SENSAT-4*-Verzeichnis) aller weiteren benötigten Dateien. Um ein Shell-Script, das nacheinander für alle Kanäle *MODTRAN* und *SENSAT-4* startet, ausführen zu können, müssen die Dateien eindeutige Namen haben. Es

wurden die Namen *mod[0-9].file* und *sen[0-9].file* gewählt. Das Shell-Script muß dann die beiden Dateien unter den Namen *mod.file* und *sen.file* in das *SENSAT-4*-Verzeichnis kopieren.Die Datei *mod1.file* und *sen1.file* beispielweise enthalten folgende Angaben (für -o test/300m_ch1):

mod1.file:

test/300m_ch1.modpar1	Eingabeparameter für *MODTRAN*
test/300m_ch1.modprint	Ausgabedatei von Ergebnissen
test/300m_ch1.modres1	Ausgabe Atmosphärendaten
test/300m_ch1.modresx	Ausgabe Atmosphärendaten
spectral/dummy1.dat	Leere Dummy-Datei

sen1file:

nue.senpar	Eingabeparameter für *SENSAT-4*
test/300m_ch1.senprint	Ausgabedatei von Ergebnissen
test/300m_ch1.modres1	Ergebnisse von *MODTRAN*
test/300m_ch1.tmp2	Temporärdatei von *SENSAT-4*
test/300m_ch1.tmp3	Temporärdatei von *SENSAT-4*
test/300m_ch1.tmp4	Temporärdatei von *SENSAT-4*
test/300m_ch1.modresx	Atmosphärendaten von *MODTRAN*
spectral/dummy1	Leere Dummy-Datei
spectral/dummy2	Leere Dummy-Datei
spectral/dummy3	Leere Dummy-Datei
sensor/dachan1.cal	Datei mit Kalibrationswerten
test/300m_ch.atm1	Ergebnisdatei von *SENSAT-4*
sensor/band1.resp	Spektrale Response Daten
bbcali/dummy.bbc	Leere Dummy-Datei
test/300m_ch1.senres1	Ausgabedatei von Ergebnissen
test/300m_ch1.senres2	Ausgabedatei von Ergebnissen

Die Datei **.modpar1* wird von *sensat_input* erzeugt.

Das dann benötigte Shell-Script sieht folgendermaßen aus:

```
#!/bin/sh

for chan in 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9
do
cp <path>/mod$chan.file mod.file
cp <path>/sen$chan.file sen.file
modtran
sensat4
done
```

8.1.2 therm_input

Das Programm *therm_input* dient zur Erzeugung der Eingabeparameter für den thermalen Spektralbereich (Kanal 11) des Daedalus AADS 1268. Die verwendeten Parametervorgaben sind dem Programm *sensat_input* recht ähnlich.

Eingabeparameter:

Das Programm *therm_input* benötigt ebenfalls folgende Eingaben auf Kommandoebene:

1. - o Name und Pfad der Ausgabedateien ohne Endungen
2. - r Name der Datei des Radiosondenprofils

Das Programm erwartet folgende Eingaben:

1.	Visibility:	Sichtweite in km (IVIS)
2.	Haze Model:	ländlich oder städtisch (IHAZE)
3.	Ground Altitude:	Höhe über NN in km (GNDAL)
4.	Sensor Altitude:	Flughöhe über NN in km (H1)
5.	Surface Temperature Low:	niedrige Bodentemperatur in °C
6.	Surface Temperature High:	hohe Bodentemperatur in °C
7.	Emissivity:	Emissivität $0 \leq \varepsilon \leq 1$
8.	Wavenumber Increment:	Schrittweite in 1/cm (≥ 5/cm)(IDV)

Die Angabe der Sonnen- und Flugparameter werden im thermalen Fall nicht benötigt.

Ausgabedateien:

Die Ausgabedateien entsprechen denen von *sensat_input*, nur daß die Dateien lediglich einmal für den Kanal 11 erzeugt werden. Außerdem ist die Datei bbcali/dummy.cal durch eine Datei, die Information für die Umrechnung von Radiance in Temperatur enthält zu ersetzen.

8.1.3 ref_image

Dieses Programm erzeugt für den reflektiven Spektralbereich aus den originalen Bild- und Headerdaten sowie den Ergebnissen der Atmosphärenkorrektur (*.*atm* Dateien) das entsprechende Reflektanzbild für die 10 Kanäle des Daedalus AADS 1268.

Eingabeparameter:

Das Programm *ref_image* benötigt folgende Eingabeparameter auf Kommandoebene:

1. -i Pfad und Name des originalen TIFF-Bildes
2. -o Pfad und Name des zu erzeugenden TIFF-Reflektanzbildes (Die Endung
   -cor wird automatisch erzeugt)
3. -a Pfad und Namen der atm-Dateien (! Endung *atm* ohne Kanalbezeichnung)

Wichtig: Die TIFF-Headerdatei muß in dem selben Verzeichnis wie die TIFF-Bilddatei sein und den entsprechenden Namen mit dem Zusatz *„-dat.tif“* haben. Heißt die TIFF-Bilddatei zum Beispiel *image.tif*, so muß die Headerdatei *image-dat.tif* heißen.

8.1.4 therm_image

Dieses Programm erzeugt das korrigierte TIFF-Bild für den thermalen Kanal des Dae-

dalus AADS 1268 Scanners.

Eingabeparameter

Die Eingabeparameter auf Kommandoebene entsprechen genau denen des Programms *ref_image*. Es wird allerdings nur eine atm-Datei benötigt.
Zusätzlich werden vom Programm aus noch folgende Eingaben erwartet:

1. Temperature Low: Temperatur entsprechend DN=0 in °C
2. Temperature High: Temperatur entsprechend DN=255 in °C

Dies dient zum Skalieren des Bildes.

8.1.5 tiff_getspec

Das Programm *tiff_getspec* extrahiert für einen definierten Bildbereich statistische Daten aus den ersten zehn Directories der TIFF-Bilder. Diese entsprechen den reflektiven Kanälen des Daedalus AADS 1268 Scanners. Damit ist es dann möglich, Spektren zu erstellen.

Eingabeparameter:

Es werden folgende Eingaben auf Kommandoebene benötigt:

1. -r row
2. -c column
3. -w width
4. -h height
5. -i tiff-filename

Ausgabe:

Es werden folgende Daten ausgegeben:
- sämtliche Eingabedaten
- die Wellenlängen der Zentren der Kanäle in µm
- der Mittelwert (Mean)
- die Standardabweichung (Stddev)
- der minimale Wert (Min)
- der maximale Wert (Max)

Die Ausgabe kann durch eine Pipe in eine beliebige Datei umgelenkt werden.

8.2 Format von *.*modpar1*

Das Format der Eingabedatei für *MODTRAN* wird im folgenden anhand eines Beispiels beschrieben. Die Parameter sind in [Richter 1991],[Richter 1992-2] und [ONTAR 1991] beschrieben.

ityps	idifu	wind	theta2	alpha	iclean	upwind								
0	3	0.0	0.0	0.0	0	0.0								
ctrue	itype	iemsct	imult	m1	m2	m3	m4	m5	m6	mdef	im	noprt	tbound	salb
F	7	2	2	1	0	0	0	0	0	0	1	-1	0.0	0.0
ihaze	iseaso	ivulcn	icstl	icld	ivsa	vis	wss	whh	rainrt	gndal				
2	0	0	0	0	0	15	0.00	0.0	0.0	0.31				
ml			Text											
19	0	0		Nürnbg, 21. August 1991 usw.										
	Radiosonden-Datei													
h1	h2	angle	range	beta	r0	len								
2.110	0.31	137	0.0	0.0	0.0	0								
iparm	iph	iday	isource											
2	2	233	0											
phi1	thsun													
-197.4	37.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0							
iv1	iv2	idv	ifwhm	Text										
22222	23810	10	20		(v1, v2, dv, ifwhm)									
irpt														
1														

Die Zeilen mit „ctrue“, „ihaze“, „h1“, „iparm“, „phi1“, „iv1“ und „irpt“ wiederholen sich entsprechend der Aufnahmegeometrie.
In der allerletzten Zeile ist „irpt“ gleich Null.

8.3 Der Bhattacharyya-Abstand

Der Bhattacharyya-Abstand B [Niemann 1983] kann zur Überprüfung der Ähnlichkeit von zwei Klassen ω_i und ω_j verwendet. Dieses Abstandsmaß berücksichtigt, neben den mittleren Pixelvektoren und den Kovarianzmatritzen (siehe Abschnitt 6.1) der beiden Spektralklassen, auch eine angenommene Normalverteilung der Wahrscheinlichkeiten $p(\vec{x}|\omega)$ und ist definiert als

$$B = \frac{1}{8}(\vec{m}_i - \vec{m}_j)^t \left(\frac{\Sigma_i + \Sigma_j}{2}\right)^{-1} (\vec{m}_i - \vec{m}_j) + \frac{1}{2}\ln\left(\frac{\left|\frac{\Sigma_i + \Sigma_j}{2}\right|}{|\Sigma_i|^{1/2}|\Sigma_j|^{1/2}}\right)$$

Der Bhattacharyya-Abstand ist ein in der Musterekennung gebräuchliches Maß für die Unterscheidbarkeit zweier Spektralklassen. Dabei entspricht einem großen Wert von B ein großer Abstand (gute Trennbarkeit) und ein kleiner Wert einem geringen Abstand. Sind die beiden Klassen identisch wird B gleich Null.

Literaturverzeichnis

1. [Albertz 1991]
   Albertz, J., „Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern: Eine Einführung in die Fernerkundung“, Wiss. Buchges., Darmstadt, (1991).
2. [Barrett & Curtis 1992]
   Barrett, E. C., Curtis, L. F., „Introduction to Environmental Remote Sensing“, Chapman & Hall, London, (1992).
3. [Bransdon & Joachain 1988]
   Brandson, B. H. and Joachain, C. J., „Physics of Atoms and Molecules“, Longman Scientific & Technical., (1988).
4. [Busen 1989]
   Busen, R., „Reflexion-Indikatrizen natürlicher Oberflächen für die AVHRR-Kanäle 1 und 2“, DLR-Mitteilung 89-16, (1989).
5. [Drewniok et al. 1993]
   Drewniok, C., Schröder, C., Lange, H., Dreschler-Fischer, L., „OSCAR - Konzeption eines Systems zur wissensbasierten Bildauswertung, in: „Naturwissenschaft und Abrüstung: Forschungsprojekte an deutschen Hochschulen“, Hrsg: Kronfeld, U., Baus, W., Ebbesen, B., Jathe, M., Lit-Verlag Münster; Hamburg, (1993).
6. [Duda & Hart 1973]
   Duda, R. O., Hart, P. E., „Pattern Classification and Scene Analysis“, John Wiley & Sons, New York, (1973).
7. [DWD 1991/92]
   Deutscher Wetterdienst, Wetteramt Nürnberg, „Klimatabelle August 1991 und April 1992“.
8. [Elachi 1987]
   Elachi, C., „Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing“, Wiley & Sons, Inc., New York, (1987).
9. [Gunßer 1993]
   Gunßer,C., „Betrifft IR-Fotos“, deutsche bauzeitung, Deutsche Verlagsanstalt Bund deutscher Baumeister, Ausg. 7/93, S. 12, (1993).
10. [de Haan et al. 1991]
    de Haan, J. F., Hovenier, J. W., Kokke, J. M. M., van Stokkom, H. T. C., „Removal of Atmospheric Influences on Satellite-Borne Imagery: A Radiative Transfer Approach“, Remote Sens. Environ., 37:1-21, (1991).
11. [Hall et al. 1991]
    Hall, F. G., Strebel, D. E., Nickeson, J. E., Goetz, S. J., „Radiometric Rectification: Toward a Common Radiometric Response Among Multidate, Multisensor Images“, Remote Sens. Environ., 35:11-27, (1991).
12. [Heeger & Simoncelli 1991]
    Heeger, D., Simoncelli, E., „OBVIUS: Object-Based Vision and Image Understanding System“, Vision Science Group, Media Laboratory, MIT, (1991).

13. [Holm et al. 1989]
Holm, R. G., Moran, M. S., Jackson, R. D., Slater, P.N., Yuan, B., Biggar, S.F., „Surface Reflectance Factor Retrieval from Thematic Mapper Data“, Remote Sens. Environ., 27:47-57, (1989).

14. [Isaacs & Vogelmann 1988]
Isaacs, R. G. and Vogelmann, A. M., „Multispectral Sensor Data Simulation Modeling Based on the Multiple Scattering LOWTRAN Code“, Remote Sens. Environ., 26:75-99, (1988).

15. [Milton 1987]
Milton, E. J., „Principles of Field Spectroscopy“, Int. J. Remote Sensing, No. 12, 1807-1827, (1987).

16. [Moran et al. 1992]
Moran, M. S., Jackson, R. D., Slater, P. N., Teillet, P. M., „Evaluation of Simplified Procedures for Retrieval of Land Surface Reflectance Factors from Satellite Output“, Remote Sens. Environ., 41:169-184, (1992).

17. [NASA 1985]
NASA, „Spectral Reflectances of Natural Targets for Use in Remote Sensing Studies“, NASA Reference Publication 1139, (1985).

18. [Niemann 1983]
Niemann, H., „Klassifikation von Mustern“, Springer Verlag, (1983).

19. [ONTAR 1991]
ONTAR Corporation, „ONCORE Personal Computer Version of the LOWTRAN-7 Atmospheric Model“, ONTAR Corporation, Brookline, (1991).

20. [Richards 1993]
Richard, J. A., „Remote Sensing Digital Image Analysis“, Springer Verlag, (1993).

21. [Richter 1991]
Richter, R., „Model SENSAT-3: Sensor - Atmosphere - Target“, DLR-IB 552-06/89, revised edition (1991).

22. [Richter 1992-1]
Richter, R., „Radiometrische Auslegung von Sensoren und quantitative Auswertung von Fernerkundungsdaten im optischen Spektralbereich“, DLR-FB 92-01, (1992).

23. [Richter 1992-2]
Richter, R., „Model SENSAT-4: Sensor - Atmosphere - Target“, DLR-IB 552-01/92, (1992).

24. [Schott et al. 1988]
Schott, J.R., Salvaggio, C., Volchok, W. J., „Radiometric Scene Normalization Using Pseudoinvariant Features", Remote Sens. Environ., 26:1-16, (1988)

25. [Thomas & Duncan 1993]
Thomas, E. M., Duncan, D. D., „Atmospheric Transmission“, in: „The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook“, Smith, F. G., Ed., V. 2,Ch. 2, ERIM and SPIE, (1993).

Danksagungen

Bei Prof. Hartwig Spitzer und Prof. Johann Bienlein möchte ich mich für das interessante Thema der Diplomarbeit, ihre hilfreiche und konstruktive Betreuung und ihr kritisches Durchsehen der schriftlichen Ausarbeitung bedanken.

Für das Ermöglichen einer inhaltlichen und örtlichen Zusammenarbeit mit dem Arbeitsbereich „Kognitive Systeme“ des Fachbereichs Informatik, möchte ich mich bei Prof. Bernd Neumann bedanken. Besonderen Dank möchte ich der Gruppe OSCAR, mit der ich in vielen Diskussionen einige knifflige Probleme lösen konnte, aussprechen: Prof. Leonie Dreschler-Fischer für viele Tips und Anregungen, Christian Drewniok für die hilfreiche Zusammenarbeit in Fragen der Bildverarbeitung und dem Bereitstellen der Klassifikationverfahren, Harald Lange für zahlreiche Anregungen bei der C-Programmierung und der Aufbereitung der Bilddaten, dem UNIX-Experten Carsten Schröder für die Installation und Wartung der Workstations und der Software.

Für die gute Zusammenarbeit in der Gruppe und die Unterstützung bei physikalischen Fragen gilt mein Dank Martin Kollewe und Rafael Wiemker. Erwähnen möchte ich auch die Volkswagen-Stiftung, durch deren Finanzierung das Projekt erst ermöglicht wurde.

Für die stets neuesten Versionen von SENSAT und vielen hilfreichen Ratschlägen möchte ich mich bei Herrn Rudolf Richter und für die Überfliegungen und Sensorkalibrationen bei Herrn Volker Amann, beide von der DLR, bedanken.

Besonderen Dank auch meinen Eltern für ihr Vertrauen in mein Studium und den erteilten Dauerauftrag zur finanziellen Unterstützung.