Vergleich multispektraler Flugzeugscanneraufnahmen mit Reflektanzmessungen am Boden

Diplom – Arbeit

Universität Hamburg
II. Institut für Experimentalphysik

Vorgelegt von Thomas Kollewe

im Dezember 1995

Zusammenfassung

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

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

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

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

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

Abstract

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

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

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

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

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

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

Inhalt

1 EINLEITUNG 1

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN 3

2.1 Definition der Fernerkundung 3

2.2 Definitionen und Einheiten 3

2.3 Reflektanzen 4

2.4 Fehlerberechnungen 5

3 MESSUNGEN 7

3.1 Versuchsbedingungen 7

3.2 Reflektanzmessungen am Boden 9

3.2.1 Das Spektroradiometer IRIS Mark IV 9

3.2.2 Planung und Vorbereitung 10

3.2.3 Durchführung der Bodenmessungen 12

3.3 Multispektrale Luftbildaufnahmen mit dem Flugzeugscanner 16

3.3.1 Der Daedalus AADS 1268 – Scanner 16

3.3.2 Durchführung der Überfliegung 20

3.3.3 Farbinfrarot-Aufnahmen 22

4 AUSWERTUNG 25

4.1 IRIS - Reflektanzspektren 25

4.1.1 Erzeugung von Reflektanzspektren 26

4.1.2 Gittersprungkorrektur 27

4.1.3 Detektorfunktion 29

4.1.4 Kalibrierung mit Spektralon-Normal 30

4.1.5 Fehlerabschätzung 32

4.2 Erzeugung von Reflektanzbildern aus den Daedalus–Luftbildaufnahmen 34

4.2.1 Datenformat – Daedalus AADS 1268 35

4.2.2 Datenkonvertierung – daedalus2tiff 36

4.2.3 Strahlungstransportsimulation – SENSAT–5 36

4.2.4 Reflektanzbildberechnung – ref_image 38

4.2.5 Überstrahlungseffekt – adjacen 39

4.2.6 Fehlerbetrachtung 39

5 VERGLEICH IRIS – DAEDALUS 43

5.1 Darstellung 43

5.1.1 Aufbereitung der IRIS-Spektren zum Vergleich 43

5.1.2 Aufbereitung der Daedalus-Spektren zum Vergleich 45

5.1.3 Gegenüberstellung 45

5.2 Vergleich mit Daedalus-Messungen aus Vorjahren 54

6 KLASSIFIKATION 59

7 DISKUSSION UND AUSBLICK 77

ANHANG – PROGRAMMBESCHREIBUNGEN 79

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

Abbildungsverzeichnis

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

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

Tabellenverzeichnis

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

1 Einleitung

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

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

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

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

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

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

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

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

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Definition der Fernerkundung

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

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

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

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

2.2 Definitionen und Einheiten

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.3 Reflektanzen

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

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

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

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

2.4 Fehlerberechnungen

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

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

3 Messungen

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

3.1 Versuchsbedingungen

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

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

Tabelle 1: Gemessene meteorologische Größen

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Die relative Feuchtigkeit ist schließlich

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

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

Tabelle 2: Gemessene Luftfeuchtigkeit

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

3.2 Reflektanzmessungen am Boden

3.2.1 Das Spektroradiometer IRIS Mark IV

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

Das Gerät besitzt folgenden Eigenschaften:

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

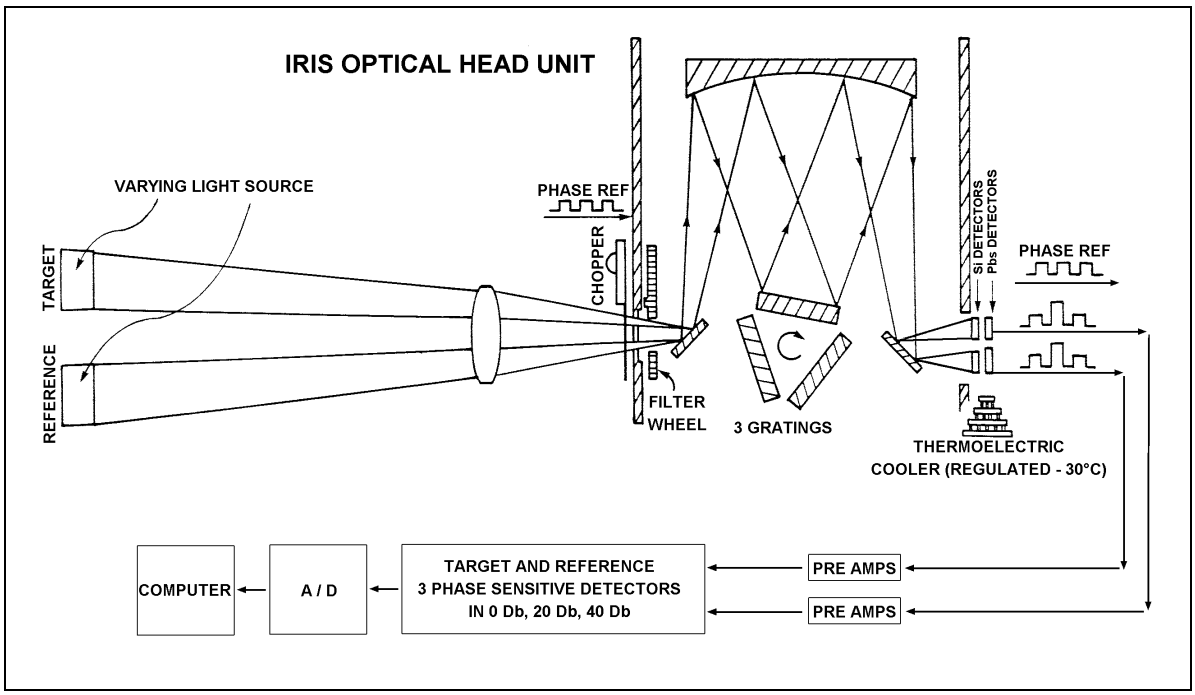

Abb. 1: Schematischer Aufbau des Spektroradiometers IRIS (Quelle: Hersteller, Fa. GER, USA)

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

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

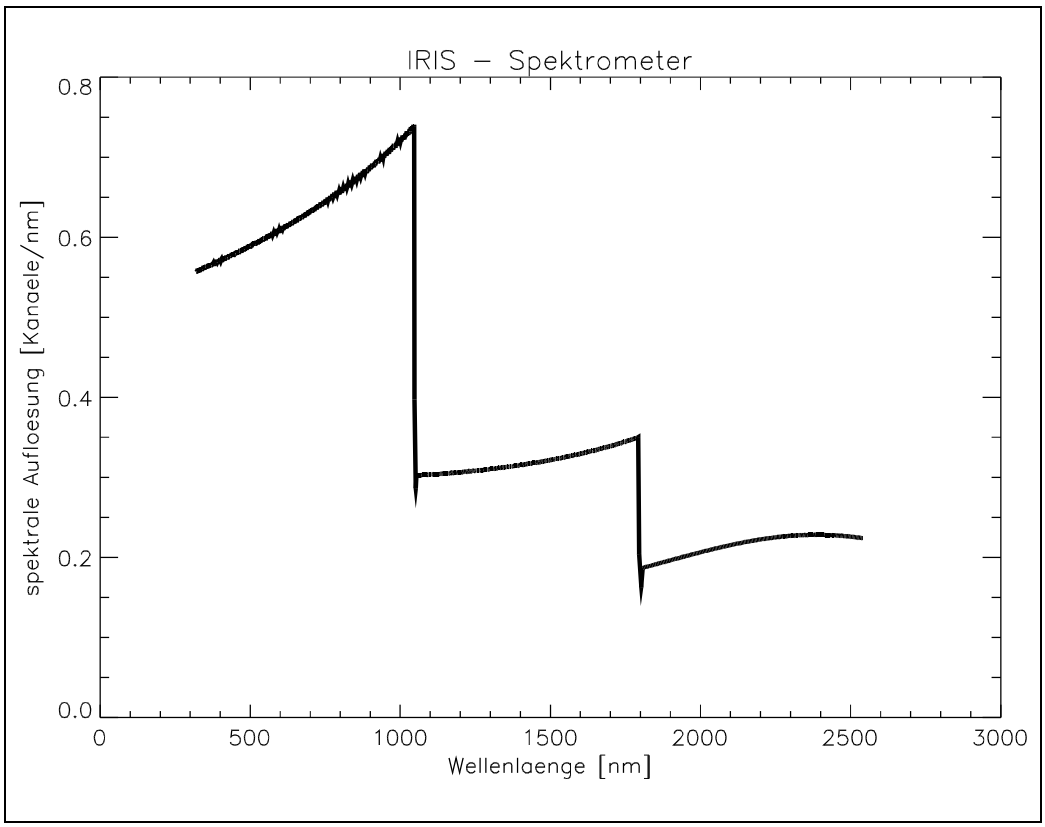

Abb. 2: Spektrale Auflösung des IRIS-Spektrometers

3.2.2 Planung und Vorbereitung

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

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

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

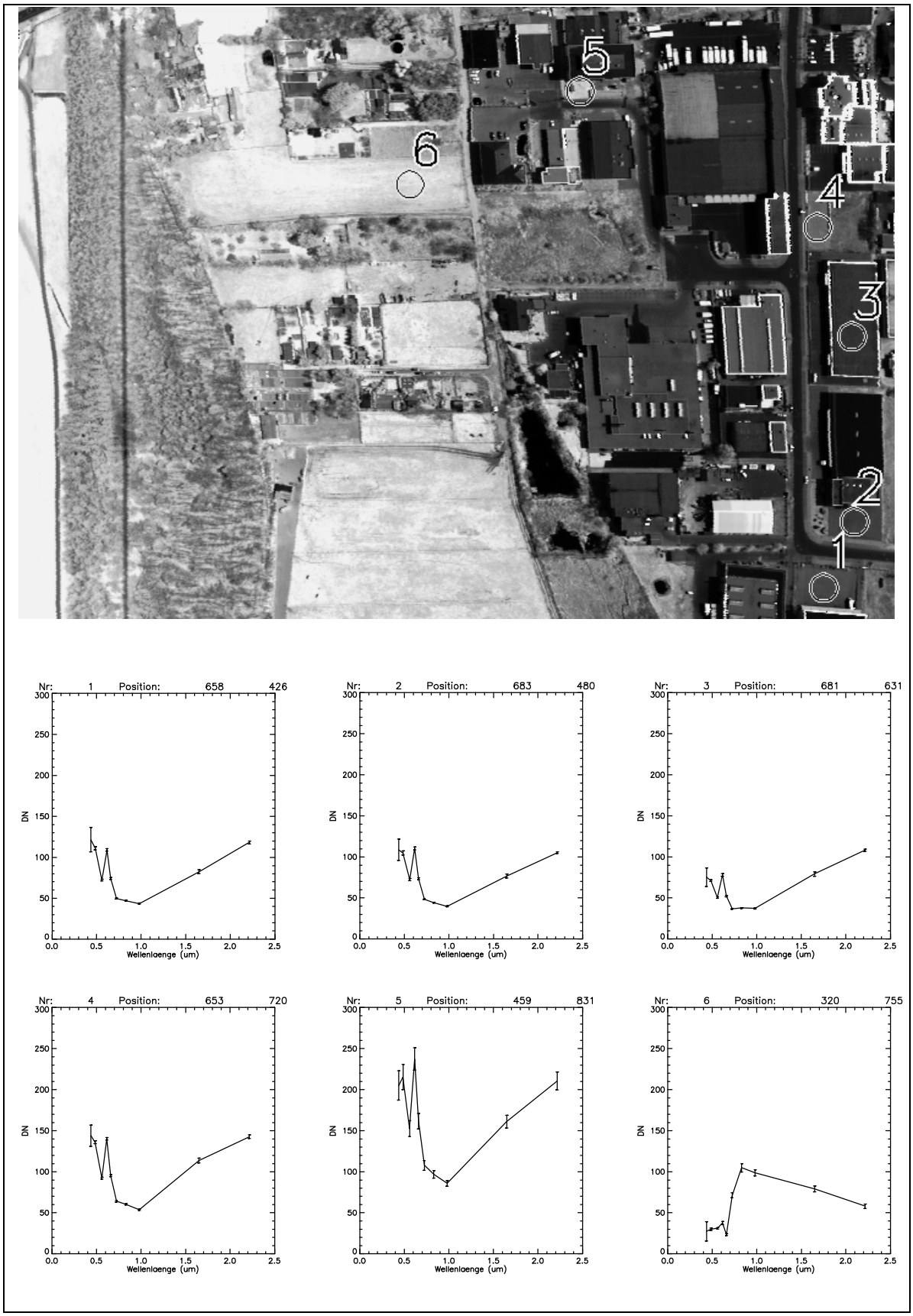

Abb. 3: Beispiel für die Meßortauswahl anhand der Daedalus-Scanner–Bilder 1992 mit den zugehörigen Spektren (DN = Digital Number = Grauwert) und deren Fehlerbalken

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

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

3.2.3 Durchführung der Bodenmessungen

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

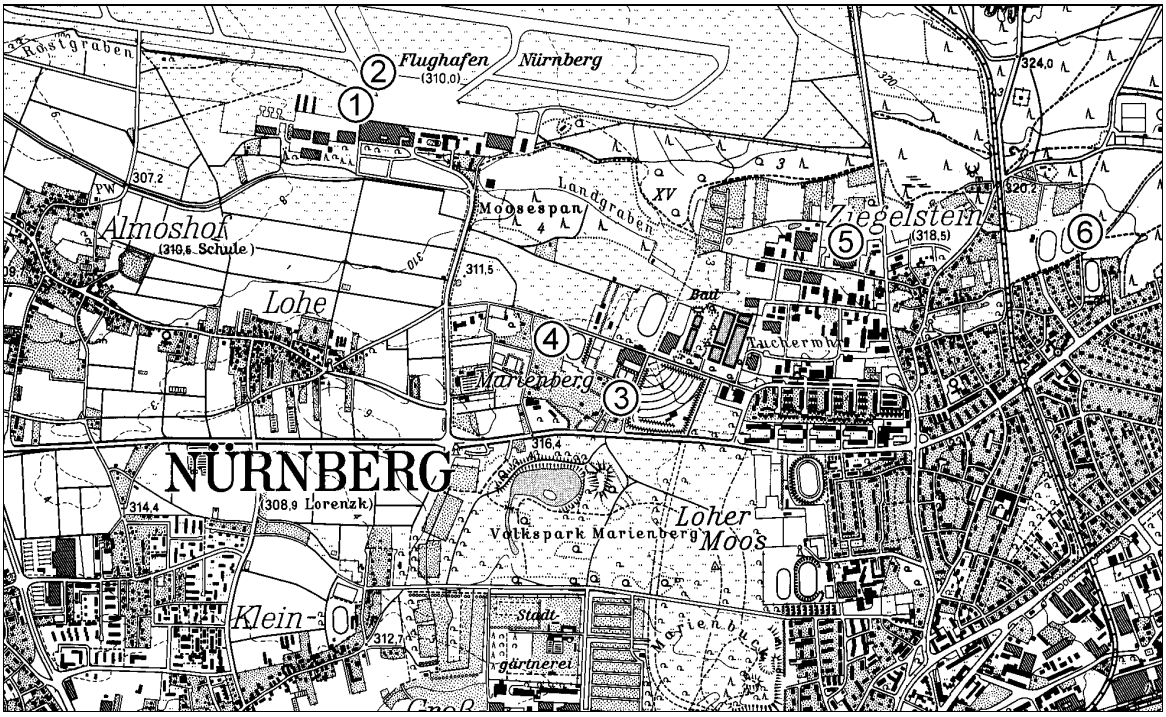

Abb. 4: Positionen der Meßorte auf der Landkarte (siehe auch Abb. 5 und Abb. 6):

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

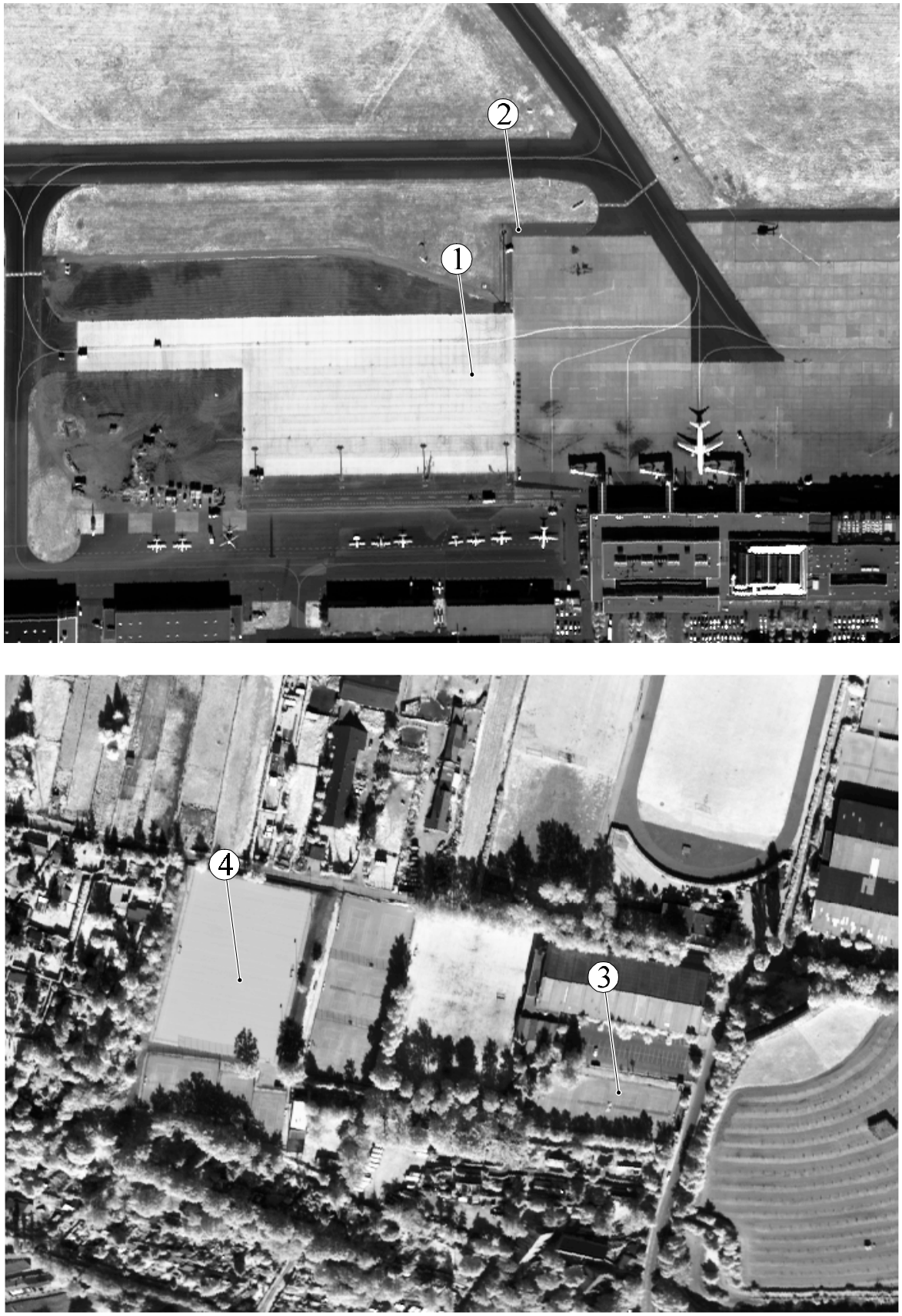

Abb. 5: Positionen der Meßorte 1–4 (Flughafenvorfeld, Asphalt, Tennisplatz, Kunstrasen) auf den Luftbildern von 1994 (300m Flughöhe, Daedalus-Kanal 3, Kontrastverstärkt).

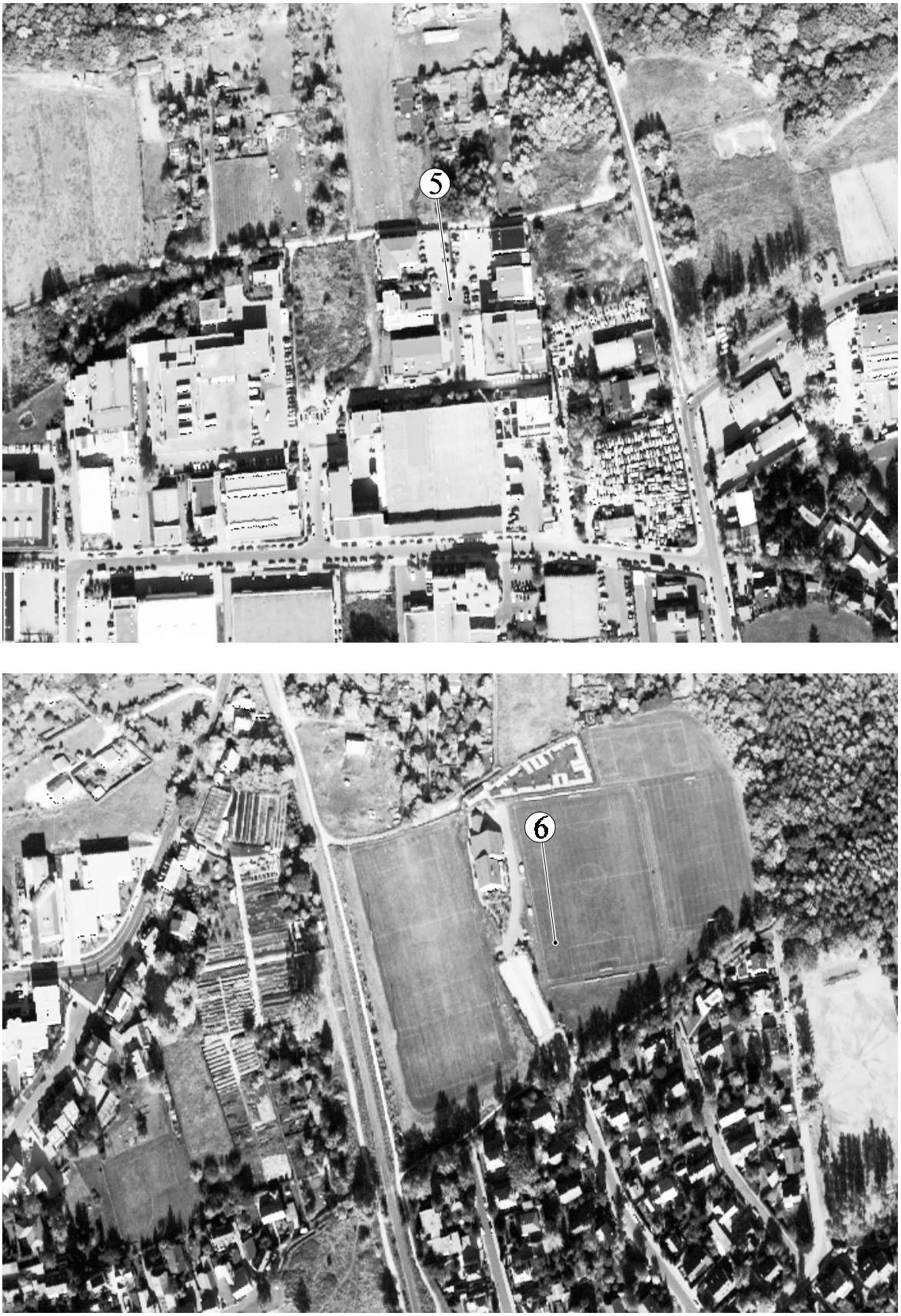

Abb. 6: Wie Abb. 5, jedoch Positionen der Meßorte 5 (Straße) und 6 (Rasen).

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

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

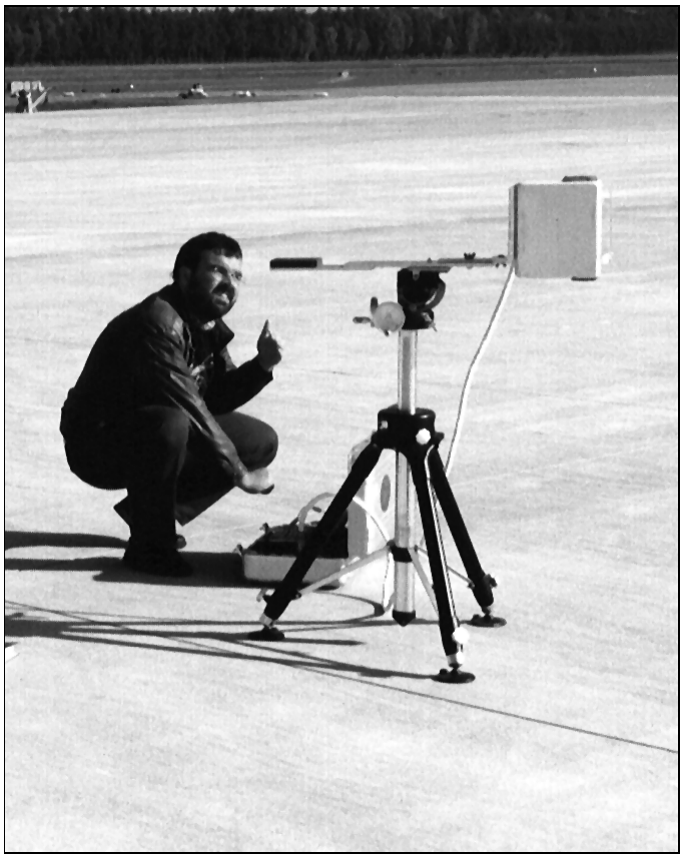

Abb. 7: Meßaufbau des IRIS-Spektrometers (mit Herrn Hausknecht, DLR) auf dem Flughafenvorfeld (Meßort 1)