Thermalkartierung städtischer Gebiete anhand von Multispektralbildern

Boris Prinz

September 1998

Physikalische Diplomarbeit
am Fachbereich Physik
der Universität Hamburg
II. Institut für Experimentalphysik
Arbeitsgruppe CENSIS, Fernerkundung

Gutachter: Prof. H. Spitzer und Prof. J. Bienlein

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden Thermalaufnahmen des flugzeuggetragenen Multispektralscanners Daedalus AADS 1268 ausgewertet und mit Bodenmessungen der Temperaturen einiger Flächen verglichen. Die Scannerdaten werden zunächst anhand zweier in den Sensor integrierten Schwarzkörperstrahler kalibriert. Die Korrektur auf den Einfluß der Atmosphäre wird mit dem Programm SENSAT-5 durchgeführt. Im Vergleich mit den Temperaturen, die von Thermoelementen zeitgleich zu einer Überfliegung des Nürnberger Flughafens gemessen wurden, ergibt sich eine Unsicherheit der Scannerdaten von 2 bis 3 °C.

Die über 24 Stunden gemessenen Tagestemperaturgänge einiger Oberflächen werden dazu verwendet, die thermische Trägheit der Materialien zu bestimmen. Dazu werden die Oberflächentemperaturen an ein einfaches Modell [Pri77] angepaßt, das aus der Wärmeleitungsgleichung und einer Vereinfachung der ein- und austretenden Wärmeflüsse folgt.

Es liegen Scannerdaten von verschiedenen Tageszeiten vor. Die Temperaturbilder einer morgendlichen Überfliegung werden mit einem paßpunktgestützten lokalen Verfahren auf die einer mittäglichen Überfliegung registriert. So erhält man einen multitemporalen Merkmalsraum, der zur Klassifikation verwendet werden kann. Eine wissensbasierte Klassifikation, die mit Temperatur-Schwellwerten und dem Vegetationsindex NDVI arbeitet, erreicht eine Klassifikationsgenauigkeit (κ-Wert) von 0,68.

Abstract

In this study thermal recordings of the airborne multispectral scanner Daedalus AADS 1268 are calibrated and compared to surface temperatures obtained by ground measurements. The scanner data is calibrated using the two black bodies that are integrated in the sensor. The software package SENSAT-5 is then used to adjust the data with respect to the influence of the atmosphere. In comparison to temperatures measured by thermocouples during a flight campaign over the airport of Nuremberg the error of the scanner data is estimated to be 2 to 3 °C.

The temperatures of a few surfaces that were measured over 24 hours are used to calculate the thermal inertia of these materials. The surface temperatures are fitted to a simple model [Pri77] which is derived from the heat conductance equation and an approximation of in- and outgoing heat fluxes.

Scanner data recorded at different times of day are available. Temperature images taken in the early morning and at noon, respectively, are co-registered locally using ground control points. Thus, a multi-temporal feature space is formed that can be used for classification. A knowledge-based classification algorithm using temperature thresholds and the vegetation index NDVI yields a classification accuracy (κ-value) of 0.68.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1 Einleitung

Bei der Erdbeobachtung mit Hilfe von Luft- und Satellitenbildern werden zunehmend Sensorsysteme eingesetzt, die in mehreren Wellenlängenbereichen abbilden. Oft wird zusätzlich zu dem sichtbaren und nahen infraroten Licht auch die Wärmestrahlung der Erdoberfläche aufgezeichnet. Diese Daten erlauben es, Rückschlüsse auf die Erwärmung der Objekte auf dem Erdboden zu ziehen.

Die Arbeitsgruppe „Physikalische Grundlagen der Fernerkundung“ der Universität Hamburg befaßt sich mit den physikalischen Prozessen, die bei der Auswertung von multispektralen Luftbildern eine Rolle spielen. Dabei geht es vor allem darum, die Wechselwirkung von Strahlung mit den Oberflächen und der Atmosphäre zu untersuchen. Das Ziel ist es, von Beleuchtungsverhältnissen unabhängige bildhafte Darstellungen (z. B. Reflektanzbilder) zu erhalten, um Daten, die zu verschiedenen Zeiten aufgenommen wurden, besser vergleichen zu können. Ein weiteres Ziel der Gruppe ist die Untersuchung von Verfahren zur Einteilung der am Boden vorkommenden Objekte in bestimmte Klassen. Aufgrund der ständig zunehmenden Menge an Fernerkundungsdaten liegt das Hauptinteresse an einer möglichst automatisierten Verarbeitung.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Kalibration und Auswertung von Thermalbildern, die von einem flugzeuggetragenen Multispektral-Scanner (Daedalus AADS 1268) aufgenommen wurden. Die Kalibration erfordert zunächst eine Interpolation der Rohdaten zwischen den Meßwerten zweier in den Sensor integrierten Temperaturstrahler definierter Temperatur. Außerdem müssen die Daten auf den Einfluß der Atmosphäre korrigiert werden.

Während einer Überfliegung des Flughafens Nürnberg und seiner Umgebung wurden Bodenmessungen von Oberflächentemperaturen verschiedener Flächen durchgeführt. Die so gemessenen kinetischen Temperaturen konnten mit den vom Scanner aufgezeichneten Strahlungstemperaturen verglichen werden. Ein grundsätzliches Problem hierbei ist, daß die Emissivität der untersuchten Oberflächen unbekannt ist. Oberflächen mit einer niedrigen Emissivität zeigen eine geringere Strahlungstemperatur im Vergleich zur kinetischen Oberflächentemperatur.

Da die Aufzeichnung der kinetischen Temperaturen kontinuierlich über 24 Stunden erfolgte, konnte ein Modell, das die zeitliche Änderung der Temperatur vorhersagt, an die Meßwerte angepaßt werden. So war es möglich aus den Tagestemperaturkurven die thermische Trägheit einiger Oberflächen zu bestimmen.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Klassifikation der Luftbilder aufgrund der thermischen Information. Es lagen Thermaldaten städtischer Gebiete vor, die zu verschiedenen Tageszeiten aufgenommen wurden. Diese wurden aufeinander registriert und die unterschiedliche Aufheizung der Materialien wurde für eine wissensbasierte Klassifikation verwendet.

Schließlich wurde die Fragestellung untersucht, ob sich die Betriebszustände von Anlagen und Fahrzeugen anhand von Thermalbildern mit einer Auflösung von etwa einem Meter feststellen lassen. Dies ist vor allem für die Verifikation von Abrüstungsmaßnahmen von Interesse.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen der multispektralen Fernerkundung kurz dargestellt werden. Insbesondere die Wärmestrahlung ist für diese Arbeit von Bedeutung. Die Emissivität einer Oberfläche stellt den Zusammenhang zwischen ihrer kinetischen Temperatur und der von ihr ausgehenden Wärmestrahlung her. Der zeitliche Verlauf der Oberflächentemperatur wird wesentlich von der thermischen Trägheit bestimmt. An die Beschreibung des verwendeten Detektors schließt sich eine Übersicht über die notwendigen geometrischen Entzerrungen der Luftbilder an. Schließlich werden Methoden zur Klassifikation von multispektralen Scannerbildern behandelt und die Bestimmung der Klassifikationsgenauigkeit erläutert.

2.1 Multispektrale Fernerkundung

Unter Fernerkundung versteht man die Gewinnung von Information über Art und Eigenschaften entfernter Objekte [KS88]. Obwohl der Begriff ursprünglich für die Informationsgewinnung aus dem Weltraum durch Satelliten gebraucht wurde, hat er sich später auch für die flugzeuggetragenen Systeme eingebürgert.

In der Fernerkundung erfolgt die Übertragung der Information vom Objekt auf dem Erdboden zum Sensor durch elektromagnetische Strahlung. Sieht man von aktiven Fernerkundungsystemen (Radar, Laser) ab, so gibt es zwei Arten von Strahlungsquellen, die in der Fernerkundung von Bedeutung sind: die Sonne und die Objekte selbst.

Wie in Abbildung 2.1 angedeutet, wird die von der Sonne kommende Strahlung an den Objekten auf dem Erdboden reflektiert und ein Teil der Strahlung gelangt in den Sensor. Bei dieser Strahlung handelt es sich überwiegend um sichtbares und infrarotes Licht. Die langwellige Wärmestrahlung wird zum größten Teil direkt von den Objekten emittiert. Der Wellenlängenbereich dieser Strahlung wird auch als thermisches Infrarot bezeichnet.

2.2 Thermische Emission von Strahlung

Alle Festkörper, Flüssigkeiten und Gase mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts ($-273{,}15$ °C $= 0$ K), senden elektromagnetische Strahlung aus. In einem Gas oder einer Flüssigkeit werden Moleküle durch Stöße angeregt. Durch Emission von elektromagnetischer Strahlung, bzw. Photonen kehren die Moleküle wieder in ihren energetischen Grundzustand zurück. Im Festkörper wird Wärme durch Gitterschwingungen (Phononen) und in Metallen zusätzlich durch freie Elektronen transportiert. In jedem Fall bewirkt die thermische Bewegungsenergie, daß Teilchen im Energieniveauschema umso eher auch in höheren Niveaus

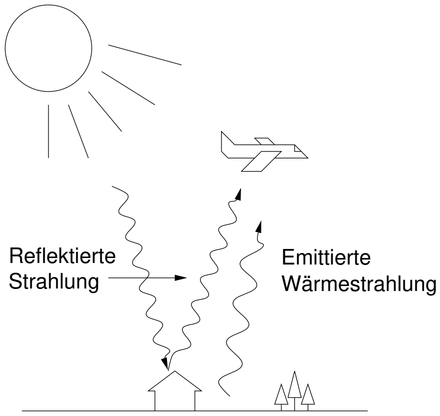


Abbildung 2.1: Strahlungspfad in der Fernerkundung

vorkommen, je höher die Temperatur ist. Durch spontane Emission von Photonen „fallen" die Teilchen dann auf nicht besetzte niedrigere Niveaus herab [KS88].

Die spektrale Verteilung der Wärmestrahlung wurde 1900 von *Max Planck* erklärt. Elektromagnetische Strahlung, die sich innerhalb eines Hohlraumes im thermischen Gleichgewicht befindet, ist quantisiert, analog zum harmonischen Quantenoszillator [KK93]. Bohrt man ein kleines Loch in den Hohlraum, kann das System elektromagnetische Strahlung emittieren und absorbieren. Man nennt den Hohlraum (genauer das Loch) einen schwarzen Strahler, wenn die auf das Loch auftreffende Strahlung vollständig absorbiert wird [Wal89]. Die spektrale Strahldichte L_{SK} eines schwarzen Körpers ist (bei einer bestimmten Wellenlänge) nur von seiner Temperatur T abhängig und wird durch das *Plancksche Strahlungsgesetz* beschrieben:

$$L_{\mathrm{SK}}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5(\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1)}, \tag{2.1}$$

mit

$$c_1 = 2hc^2/\mathrm{sr} = 1{,}19 \times 10^{-16}\ \mathrm{Wm^2sr^{-1}}$$

und

$$c_2 = hc/k = 1{,}439 \times 10^{-2}\ \mathrm{K \cdot m}.$$

Dabei ist h das Plancksche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit und k die Boltzmann-Konstante. Die spektrale Strahldichte ist auf den Raumwinkel 1 sr bezogen.

In Abbildung 2.2 sind die spektralen Strahldichten zweier schwarzer Körper unterschiedlicher Temperatur gegen die Wellenlänge aufgetragen. Bei einer Oberflächentemperatur von 5780 K liegt das Maximum der Strahldichte bei 500 nm, also genau im Bereich des sichtbaren Lichts. Mißt man das Spektrum der von der Sonne ausgehenden Strahlung, so stellt man fest, daß es angenähert dem Spektrum eines schwarzen Körpers der Temperatur 5780 K entspricht, daher kennt

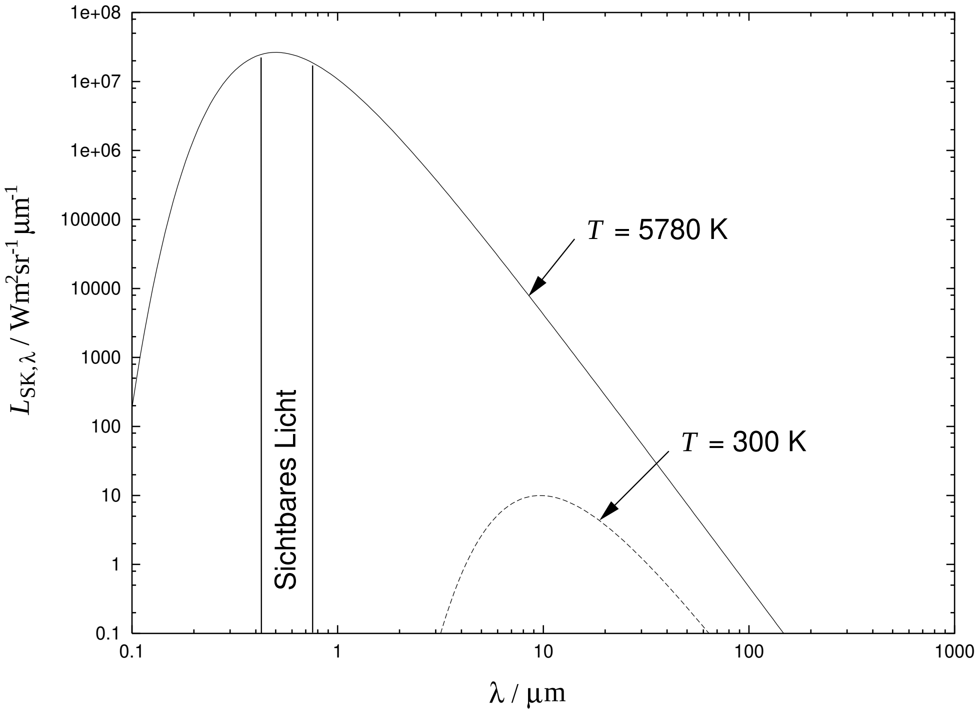


Abbildung 2.2: Spektrale Strahldichte von schwarzen Körpern verschiedener Oberflächentemperaturen. Man beachte den doppelt logarithmischen Maßstab

man die Oberflächentemperatur der Sonne. Die maximale Strahlungsintensität eines Körpers mit einer Temperatur von 300 K liegt dagegen bei ungefähr 10 μm. Da die Temperaturen von Objekten auf der Erdoberfläche in diesem Bereich zu finden sind, beschreibt die zweite Kurve näherungsweise das von der Erde emittierte Spektrum.

Das Spektrum der gesamten von der Erdoberfläche kommenden Strahlung läßt sich also in zwei Bereiche einteilen:

1. Das von der Sonne emittierte Licht (Maximum bei 500 nm) wird von den Objekten auf der Erdoberfläche teilweise reflektiert.

2. Die Objekte emittieren aufgrund ihrer Eigenwärme Strahlung im Bereich um 10 μm.

Interessant ist die relative Änderung der Strahldichte $L(T)$ als Funktion einer Temperaturänderung. Aus Gl. (2.1) folgt:

$$\frac{dL}{dT} = L \cdot \frac{c_2}{\lambda T^2} \cdot \frac{e^{c_2/(\lambda T)}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1}$$

Für typische Werte $\lambda = 10$ μm und $T_0 = 300$ K ergibt sich:

$$\left.\frac{dL}{L}\right|_{T_0} = \frac{dT}{T_0} \cdot \underbrace{\frac{c_2}{\lambda T}}_{\approx 5} \cdot \underbrace{\frac{e^{c_2/(\lambda T)}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1}}_{\approx 1} \tag{2.2}$$

Eine Änderung der Oberflächentemperatur von 1% (3 °C) hat also eine Änderung der Strahldichte von 5% zur Folge.

2.3 Emissivität

Um die Materialabhängigkeit der Strahlungsemission zu beschreiben, definiert man den *spektralen Emissionsgrad* (Emissivität) eines Körpers als Verhältnis der Dichte der von seiner Oberfläche ausgehenden Strahlung zu der Strahldichte eines schwarzen Körpers der gleichen Temperatur:

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{L(\lambda, T)}{L_{\text{SK}}(\lambda, T)} \tag{2.3}$$

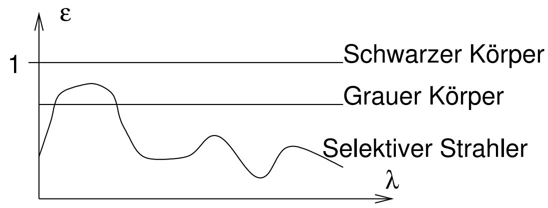
Ein schwarzer Körper hat also definitionsgemäß die Emissivität $\epsilon = 1$.

Im allgemeinen ist die Emissivität von der Wellenlänge abhängig. Man unterscheidet drei Typen von Körpern:

Schwarzer Körper: $\epsilon(\lambda) = 1$

Grauer Körper: $\epsilon(\lambda) = \text{const.}$

Selektiver Strahler: $\epsilon(\lambda)$ ist wellenlängenabhängig.



Die Emissivität der meisten Oberflächen liegt nahe bei Eins. Eine Ausnahme sind Metalle, die eine sehr geringe Emissivität besitzen, wenn die Oberfläche poliert ist. Die Emissivität steigt mit der Temperatur an und erhöht sich stark, wenn sich eine Oxidschicht auf dem Metall bildet [Ela87].

Aus Gleichung (2.3) ergibt sich eine große Schwierigkeit, wenn man Oberflächentemperaturen von Objekten mit den Methoden der Fernerkundung bestimmen will: Man kann zwar die Strahldichte der von einem Körper ausgehenden Wärmestrahlung messen, aber die Emissivität und damit die Oberflächentemperatur bleiben unbekannt. Daher werden häufig nur *Strahlungstemperaturen* (engl. *brightness temperature*) von Oberflächen angegeben, für die per definitionem $\epsilon = 1$ gilt.

Es gibt zwei Möglichkeiten, die Emissivität zu bestimmen, ohne die Oberflächentemperatur kennen zu müssen:

1. Direkte Messung der Emissivität: Hierzu ist ein aktives System notwendig. Beispielsweise kann die vom Boden reflektierte Strahlung eines CO_2-Lasers gemessen werden [AC82]. Man erhält so das Absorptionsvermögen der Oberfläche. Nach dem Kirchhoffschen Gesetz ist dieses gleich dem Emissionsvermögen im thermischen Gleichgewicht.

2. Die Intensität der Wärmestrahlung wird in mehreren Wellenlängenbereichen gemessen. Da die Emissivität aber im allgemeinen wellenlängenabhängig ist, fügt man mit jedem Kanal auch eine neue Unbekannte hinzu. Daher muß die Annahme „grauer Körper“ ($\epsilon = \text{const.}$) verwendet werden. Mit einem Sensor, der zwei thermische Kanäle besitzt, hat man beispielsweise zwei Gleichungen (Strahldichten) mit den beiden Unbekannten T und ϵ.

Aus der Abschätzung (2.2) folgt für die Fernerkundung, daß die Emissivität der beobachteten Objekte sehr genau bekannt sein muß, wenn die kinetische Temperatur aus der Strahldichte bestimmt werden soll. Ein Zahlenbeispiel kann dies verdeutlichen:

> Die Strahldichte eines Körpers mit der Emissivität $\epsilon = 0{,}9$ und einer Temperatur von 20°C werde bei $\lambda = 10\ \mu$m gemessen. Die Abweichung von der Strahldichte eines schwarzen Körpers derselben Temperatur beträgt 10%, daher ist die relative Änderung der Temperatur nach Gl. (2.2) 2%. Da die Temperatur aber auf den absoluten Nullpunkt bezogen werden muß, ist die Temperaturdifferenz
>
> $$(20 + 273{,}15)\ \mathrm{K} \cdot 0{,}02 = 5{,}9\ \mathrm{K},$$
>
> d. h. unter der Annahme $\epsilon = 1$ wird die Temperatur um 5,9 °C unterschätzt.

Obwohl die Emissivitäten der meisten Stoffe nahe bei Eins liegen (außer bei Metallen) zeigt dieses Beispiel, daß die Annahme $\epsilon = 1$ zu einer erheblichen Abweichung von der kinetischen Temperatur führt.

2.3.1 Emissivitäten aus der Literatur

Grundsätzlich ist es schwierig, Werte für die Emissivitäten von realen Stoffen wie Baustoffen in der Literatur zu finden, da die Emissivität sehr stark von folgenden Faktoren abhängt:

- Die Oberflächenbeschaffenheit (Rauhigkeit) spielt eine entscheidende Rolle, da ein sehr rauher Körper sich zunehmend wie ein schwarzer Körper verhält; eine polierte Oberfläche dagegen hat eine sehr geringe Emissivität. In der Literatur ist die Oberflächenbeschaffenheit der untersuchten Proben im allgemeinen nicht spezifiziert [SHL88].

Material	Kohlrausch [Koh96]	IR Handbook [Zis93]	Rees [Ree90]
Wasser	0,95	0,96	0,99
Vegetation	—	—	0,98
Erdboden (feucht)	—	0,95	0,94
Sand	0,76	0,90	0,95
Gips	0,85	0,91	0,91
Asphalt	—	0,91	0,97
Beton	0,94	0,92	0,92
Dachpappe	0,91	—	—
Ziegelstein (rot)	0,93	0,93	0,93
Stahl (poliert)	0,11	—	—

Tabelle 2.1: Emissivitätswerte verschiedener Materialien bei 20 °C

- Stoffe, die der Witterung ausgesetzt sind, verändern mit der Zeit ihre Emissivität, da sich die Oberflächenbeschaffenheit ändert.
- Die Emissivität selbst ist temperaturabhängig.

In Tabelle 2.1 sind einige Werte für Emissivitäten zusammengestellt, die aus drei Büchern stammen [Koh96, Zis93, Ree90]. Es zeigt sich, daß selbst homogene Stoffe wie z. B. Wasser sehr unterschiedlich bewertet werden. Auch sind die Bezeichnungen (Asphalt, Beton, ...) sehr ungenau; die Proben werden nicht hinsichtlich ihrer Oberflächenrauhigkeit beschrieben. Die tabellierten Werte können daher nur als grobe Anhaltspunkte für die zu erwartenden Emissivitäten dienen.

In einer Studie der Indiana State University [AC82] wurde die Emissivität von 1411 Hausdächern bestimmt. Dazu wurden zwei thermische Kanäle und die Annahme des grauen Körpers verwendet. Es stellte sich heraus, daß 98,8% der Dächer eine Emissivität von 0,89 bis 0,95 besaßen.

2.3.2 Bestimmung der Emissivität bei Thermalsensoren mit einem Kanal

Wenn nur ein Kanal im Bereich der thermischen Infrarotstrahlung zur Verfügung steht, gibt es keine Möglichkeit, die Emissivität direkt aus den Daten zu bestimmen. Zunächst ist es wichtig, sich klarzumachen, daß die Emissivität eines Materials nicht aus seiner Farbe, bzw. der Reflektanz $\rho(\lambda)$ im Bereich des sichtbaren und nahen infraroten Lichts abgeleitet werden kann. Obwohl die Beziehung $\epsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda)$ (Kirchhoffsches Gesetz) gilt[1], sind die Materialeigenschaften in

[1] Strenggenommen gilt dies nur für Systeme im thermodynamischen Gleichgewicht, d. h. der Körper muß räumlich und zeitlich konstante Temperatur besitzen und darf keine Wärme mit der Umgebung austauschen. Diese Bedingungen kommen in der Natur nicht vor. Eine Diskussion des Kirchhoffschen Gesetzes in der Fernerkundung findet sich in [Bad97]

den beiden Wellenlängenbereichen (sichtbares Licht / Wärmestrahlung) sehr unterschiedlich. Ein in der Literatur (z. B. [Ela87]) oft genanntes Beispiel ist Schnee. Im Bereich des sichtbaren Lichts ist Schnee ein sehr guter diffuser Reflektor. Man könnte nun annehmen, daß die Emissivität von Schnee gering ist. In Wirklichkeit ist Schnee aber ein sehr guter Emitter im Bereich des thermischen Infrarot mit einer Emissivität, die nahe bei Eins liegt.

Die einzige verbleibende Möglichkeit ist eine indirekte Bestimmung der Emissivität, indem die untersuchte Szene aufgrund der Information in den Reflektanzkanälen klassifiziert wird. Den Klassen könnten dann im Prinzip bekannte Emissivitäten zugeordnet werden. Dieses Verfahren ist allerdings aus folgenden Gründen bei gegenwärtigem Kenntnisstand nicht praktikabel:

1. Eine Klassifikation erfordert einen hohen Aufwand, wenn sie genau sein soll, da nur eine überwachte Klassifikation in Frage kommt. Selbst wenn unüberwacht klassifiziert würde, muß die Klassifikationsgenauigkeit ermittelt werden, was wiederum eine überwachte Klassifikation erfordert.

2. Wie der vorhergehende Abschnitt gezeigt hat, ist es nicht möglich, einfach Emissivitätswerte aus einer Datenbank abzufragen. Eine Charakterisierung der Oberflächenstruktur der Materialien, bzw. eine direkte Messung der Emissivität müßte vor Ort durchgeführt werden. Deshalb ist eine flächendeckende Bestimmung nicht möglich.

In dieser Arbeit wurde stattdessen durchgehend mit einer Emissivität von 0,95 gerechnet. Dies ist ein Wert, der einen guten Mittelwert aus Vegetation und künstlichen Flächen darstellt. Es führt allerdings dazu, daß die Temperatur von Metallen wesentlich unterschätzt wird. Da eine Metallfläche sich damit aber sehr von den anderen Flächen unterscheidet, ist dies sofort offensichtlich.

2.4 Thermische Trägheit

Die thermische Reaktion eines Körpers auf einen zeitlich variierenden Energiefluß auf seine Oberfläche wird neben äußeren Parametern, wie z. B. Feuchtigkeit, vor allem durch seine thermische Trägheit bestimmt. Zwei Größen gehen in die thermische Trägheit ein:

Die spezifische Wärmekapazität c [J kg^{-1} K^{-1}]: Wenn ein Körper sich durch eine große Wärmekapazität auszeichnet, erfährt er bei Absorption einer gegebenen Wärmemenge nur eine geringe Temperaturänderung. Seine thermische Trägheit ist demnach groß.

Die thermische Leitfähigkeit K [J m^{-1} K^{-1} s^{-1}]: Ein guter thermischer Leiter kann eine gegebene Wärmemenge besser in tiefere Schichten leiten, so daß der Anstieg der Oberflächentemperatur geringer ist. Dies bedeutet ebenfalls, daß der Körper eine hohe thermische Trägheit besitzt.

Damit erscheint die folgende Definition der thermischen Trägheit P angemessen:

$$P = \sqrt{K\rho c},$$

wobei ρ die Dichte des Körpers ist. Die Dichte geht in die Definition ein, weil die spezifische Wärmekapazität üblicherweise auf die Masse bezogen ist; hier interessiert aber die Wärme pro Volumeneinheit. Die Dimension der thermischen Trägheit ist [J m^{-2} K^{-1} s$^{-1/2}$].

Modellierung der Oberflächentemperatur

Im Rahmen der *Heat Capacity Mapping Mission* der NASA, gestartet 1978, wurde versucht, die thermische Trägheit der Erdoberfläche zu bestimmen. In diesem Zusammenhang wurden von verschiedenen Autoren [Pri77, Wat82, XC95, CX96] Modelle beschrieben, die es erlauben, aus gemessenen Oberflächentemperaturen die thermische Trägheit abzuleiten.

Bisher wird in allen Modellen von einem homogenen Halbraum[2] eines bestimmten Materials ausgegangen, dessen thermische Eigenschaften (Wärmekapazität und thermische Leitfähigkeit) räumlich und zeitlich konstant sind.

Die Temperatur T in der Tiefe x zur Zeit t gehorcht der partiellen Differentialgleichung

$$K\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}, \tag{2.4}$$

die auch als Diffusionsgleichung bekannt ist. Zur Lösung der Gleichung müssen zunächst passende Randbedingungen angegeben werden. Diese sind:

1. Die Temperatur nimmt in großem Abstand von der Oberfläche einen endlichen Wert an: $T(x,t) = \text{const.}$ für $x \to \infty$.

2. Die ein- und austretenden Wärmeflüsse an der Oberfläche müssen sich aufheben. Es gilt:

$$-K\left.\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0} = (1-A)S_0\tau_{\text{atm}}\cos Z - R_{\text{surf}} + R_{\text{sky}} - H - LE, \tag{2.5}$$

mit

$$\begin{aligned}
A &= \text{Albedo der Oberfläche}\\
S_0 &= \text{Solarkonstante } (1375\ \text{Wm}^{-2})\\
\tau_{\text{atm}} &= \text{Transmissionsgrad der Atmosphäre}\\
\cos Z &= \sin\delta\sin\alpha + \cos\delta\cos\alpha\cos(\omega t) \geq 0\\
& \quad \delta = \text{Deklination der Sonne}
\end{aligned}$$

[2] Ein Halbraum ist oben durch eine Ebene begrenzt und nach unten unendlich ausgedehnt

$$\begin{aligned}
&\alpha = \text{Breitengrad}\\
&\omega = \frac{2\pi}{24\text{ h}} = \frac{2\pi}{86\,400\text{ s}}\\
&t = \text{Zeit, bezogen auf den lokalen Sonnenhöchststand}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{\text{surf}} &= \text{von der Oberfläche emittierte Wärmestrahlung}\\
R_{\text{sky}} &= \text{Wärmestrahlung der Atmosphäre}\\
H &= \text{sensibler Wärmefluß in die Atmosphäre}\\
LE &= \text{latenter Wärmefluß in die Atmosphäre}
\end{aligned}$$

Der sensible Wärmefluß entsteht durch Konvektion an der Oberfläche, d. h. die Wärme wird durch Stöße der Atome der Oberfläche mit den Molekülen der Atmosphäre transportiert. Die latente Wärme ist die Energie, die benötigt wird, Wasser auf der Oberfläche in den gasförmigen Zustand zu überführen.

Der erste Term auf der rechten Seite von Gl. (2.5) ist der von der Oberfläche aufgenommene solare Wärmefluß. Dabei geht der momentane Sonnenstand ein. Die letzten vier Terme können nicht ohne weitere Messungen bestimmt werden. Daher wird eine lineare Näherung eingeführt: Es wird angenommen, daß alle unbekannten Energieflüsse linear von der Oberflächentemperatur abhängen. Somit vereinfacht sich die zweite Randbedingung zu:

$$-k\left.\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0} = (1-A)S_0\tau_{\text{atm}}\cos Z - [A_c + BT(0,t)].$$

Die Koeffizienten A_c und B müssen durch Anpassung an die Meßwerte bestimmt werden.

Mit den oben angegebenen Randbedingungen läßt sich die Differentialgleichung (2.4) lösen. Dazu kann eine Fourierreihenentwicklung verwendet werden [XC95]. Hier soll nur das Ergebnis genannt werden. Man erhält einen Ausdruck für die Temperatur in der Tiefe x:

$$T(x,t) = \frac{A_c}{B} + (1-A)S_0\tau_{\text{atm}}\sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\exp(-k_0\sqrt{n}x)\cos(n\omega t - k_0\sqrt{n}x - \delta_n)}{\sqrt{\omega n P^2 + \sqrt{2n\omega}BP + B^2}}, \quad (2.6)$$

mit

$$\begin{aligned}
\omega &= 2\pi/(24\text{ h}),\\
k_0 &= \frac{P}{K}\sqrt{\frac{\omega}{2}},\\
\delta_n &= \arctan\left(\frac{P\sqrt{n\omega}}{\sqrt{2}B + P\sqrt{n\omega}}\right),\\
A_1 &= \frac{2}{\pi}\sin\delta\sin\alpha + \frac{1}{2\pi}\cos\delta\cos\alpha[\sin(2\psi) + 2\psi],
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
A_n &= \frac{2\sin\delta\sin\alpha}{n\pi}\sin(n\psi) + \frac{2\cos\delta\cos\alpha}{\pi(n^2-1)}[n\sin(n\psi)\cos\psi - \cos(n\psi)\sin\psi] \\
&\qquad n = 2, 3, \ldots \\
\psi &= \arccos(\tan\delta\tan\alpha).
\end{aligned}
$$

Abbildung 2.3 zeigt einen mit diesem Modell berechneten Temperaturverlauf. Man erkennt, daß die Temperatur in zunehmender Tiefe schnell abnimmt. Schließlich ist bereits in einer Tiefe von einem Meter eine konstante Temperatur erreicht. Das Abknicken der Kurven bei Sonnenaufgang und Sonnenuntergang rührt daher, daß die Sonne im vereinfachten Modell „ein-“ und „ausgeschaltet“ wird. In Wirklichkeit sorgt aber die variable Dichte der Atmosphäre dafür, daß die Sonnenstrahlen gebeugt werden, so daß auch vor dem geometrischen Sonnenaufgang Strahlung auf die Oberfläche trifft. Daher ist in realen Temperaturverläufen kein Abknicken zu beobachten.

Bemerkenswert ist auch, daß die maximale Oberflächentemperatur nicht am Mittag, sondern mit ca. zwei Stunden Verspätung erreicht wird.

Wenn man sich nur für die Oberflächentemperatur ($x = 0$) interessiert, vereinfacht sich Gl. (2.6) zu

$$
T(t) = \frac{A_c}{B} + (1-A)S_0\tau_{\text{atm}}\sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\cos(n\omega t - \delta_n)}{\sqrt{\omega n P^2 + \sqrt{2n\omega}BP + B^2}}. \tag{2.7}
$$

2.5 Einfluß der Atmosphäre

Die von einer Oberfläche emittierte Wärmestrahlung muß auf dem Weg zum Sensor zunächst die Atmosphäre durchdringen. Dabei werden auch von einer klaren Atmosphäre im Bereich von 8 bis 14 μm ca. 20% der Strahlung absorbiert. Hierfür sind die Absorptionsbanden der Luftmoleküle (besonders H_2O) und die Aerosole (Teilchen von 0,01 bis 100 μm Durchmesser) verantwortlich. Es ist also notwendig, die vom Sensor gemessenen Strahldichten auf den Einfluß der Atmosphäre zu korrigieren. Da sehr viele Parameter in die Atmosphärenkorrektur eingehen, benutzt man Software wie z. B. „MODTRAN“ [AKC+95] und darauf aufbauend „SENSAT“ [Ric92], mit der der Einfluß der Atmosphäre im Rechner modelliert wird. MODTRAN berechnet die spektrale Transmission, indem die Atmosphäre in konzentrische Kugelschalen zerlegt wird, wobei die wichtigsten Parameter Temperatur, Druck und relative Luftfeuchte sind. Diese höhenabhängigen Daten erhält man am besten aus einem Sondenaufstieg. Wenn dies nicht möglich ist, muß man auf Standardatmosphären zurückgreifen. SENSAT erweitert MODTRAN um die Wechselwirkung der Strahlung mit dem Detektor (Empfindlichkeit etc.) und dem Target (Emissivität).

In Abbildung 2.4 sind die Terme, die zur gemessenen Strahldichte beitragen, eingezeichnet:

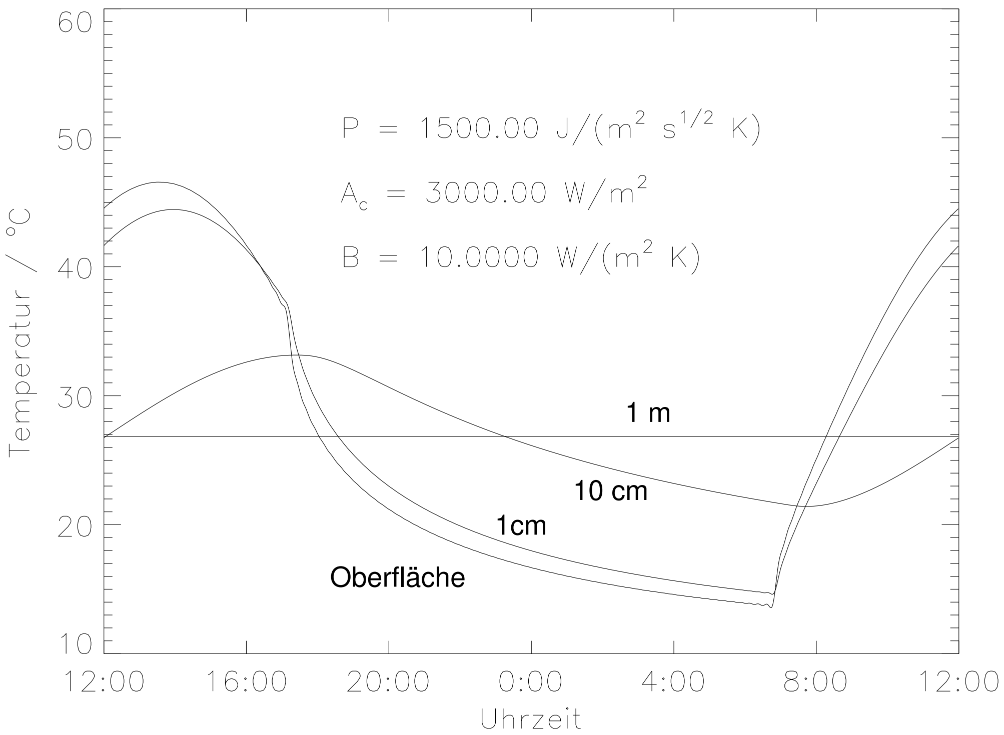


Abbildung 2.3: Nach dem Modell von [XC95] berechnete Tagestemperaturgänge eines Halbraums in verschiedenen Tiefen (0 cm, 1 cm, 10 cm, 100 cm). Die verwendeten Parameter sind $A_c = 3000\ \mathrm{W/m^2}$, $B = 10\ \mathrm{W/(m^2\ K)}$ (nach [Pri77] etwa zu erwartende Werte) und $P = 1500\ \mathrm{J/(m^2\ \sqrt{s}\ K)}$ (Mittlere thermische Trägheit für Boden, s. Tab. 4.3), Albedo $A = 0{,}2$. Die übrigen Parameter sind analog zu denen der Überfliegung gewählt (26. August 1997 in Nürnberg, s. Abschnitt 4.3.2)

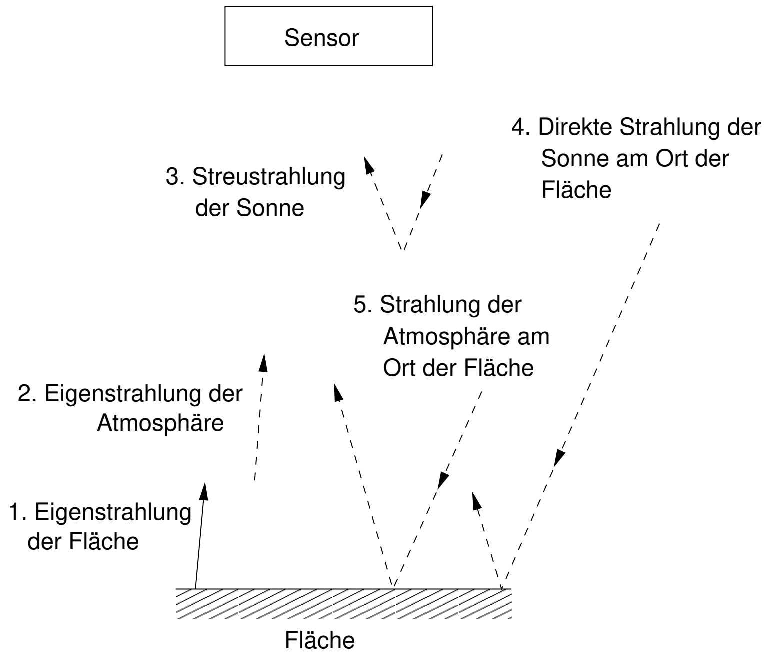


Abbildung 2.4: Von MODTRAN berechnete Beiträge zur Strahldichte (s. [RB85])

1. Die Emission der Fläche stellt den größten Anteil dar.
2. Die Luftschicht zwischen Boden und Sensor emittiert direkt in den Sensor (*path radiance*).
3. Die Streustrahlung der Sonne (Himmelslicht) muß abgezogen werden.
4. Die direkte Thermalstrahlung der Sonne am Ort der Fläche wird zu einem geringen Teil reflektiert.
5. Die diffuse Strahlung des Himmels am Ort der Fläche (integriert über den gesamten Halbraum) wird ebenfalls zu einem geringen Teil reflektiert.

Für eine Flughöhe von 300 m und eine Emissivität $\epsilon = 0{,}95$ ergeben sich folgende Anteile an der gesamten Strahldichte:

Eigenemission der Fläche	90%
Reflektierte Strahlung	2%
Strahlung der Atmosphäre und Streustrahlung der Sonne	8%

Diese Werte wurden mit SENSAT mit für die Überfliegungen (s. Kap. 3.1) typischen Parametern berechnet.

2.6 Der Multispektralscanner Daedalus AADS 1268

Das Bildmaterial, das für diese Arbeit zur Verfügung stand, wurde von dem flugzeuggetragenen Scanner Daedalus AADS 1268 aufgenommen. Im folgenden sollen kurz die Eigenschaften dieses Detektors beschrieben werden.

2.6.1 Aufbau des Detektors

Abbilddung 2.5 zeigt schematisch den Aufbau des verwendeten Detektors. Das vom Boden in den Detektor einfallende Licht wird zunächst von einem rotierenden Spiegel in ein Teleskop reflektiert. Der Spiegel besteht aus zwei Flächen, die sich abwechselnd im Strahlengang befinden, damit die Zeit zwischen zwei Scanlinien möglichst kurz bleibt. Über einen halbdurchlässigen Spiegel wird die Wärmestrahlung in den Thermaldetektor geleitet. Dieser wird mit Stickstoff gekühlt, um das elektronische Rauschen gering zu halten. Die restliche Strahlung wird durch ein Prisma in zehn Spektralbereiche zerlegt.

Die Signale der Detektoren werden verstärkt und gelangen an die Eingänge der A/D-Wandler. Die Wandler erzeugen aus den analogen Meßwerten digitale Signale mit einem Wertebereich von 256 diskreten Werten. Diese werden dann auf magnetisches Band geschrieben.

Zur Kalibration des Thermalsensors befinden sich noch zwei Schwarzkörperstrahler im Detektor. Diese werden jeweils auf einer konstanten Temperatur gehalten (möglichst auf der minimalen und maximalen auf dem Boden vorkommenden Temperatur) und für jede Scanzeile mit aufgezeichnet. Dies dient dazu, später zwischen den beiden Temperaturen eine Interpolation durchzuführen. Somit ist es nicht notwendig, den Zusammenhang zwischen der Zählrate und der Strahldichte der Wärmestrahlung zu kennen. Für die anderen Kanäle ist aber eine regelmäßige Kalibration auf absolute Strahldichten unumgänglich.

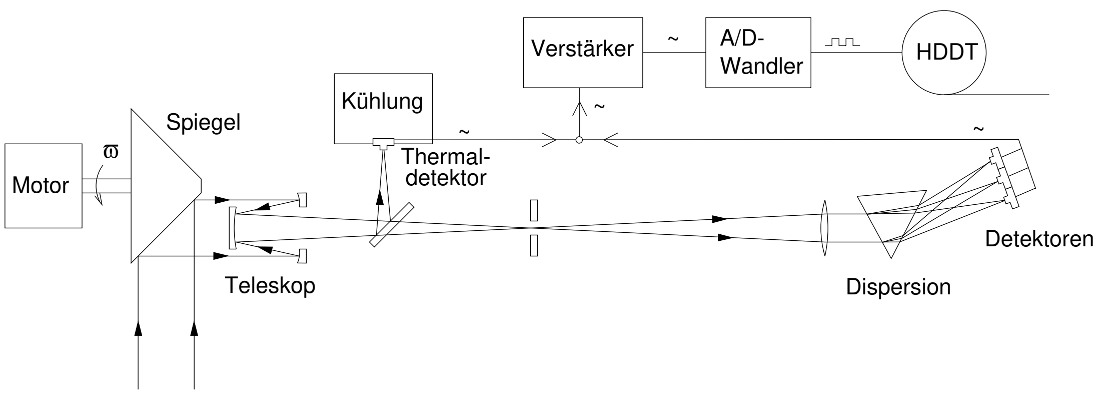


Abbildung 2.5: Aufbau des Detektors Daedalus AADS 1268

Kanal	Spektralbereich / μm	Bandbreite / μm	Detektormaterial
1	0,42 – 0,45	0,03	Si
2	0,45 – 0,52	0,07	Si
3	0,52 – 0,60	0,08	Si
4	0,605 – 0,625	0,02	Si
5	0,63 – 0,69	0,06	Si
6	0,695 – 0,75	0,055	Si
7	0,76 – 0,90	0,14	Si
8	0,91 – 1,05	0,14	Si
9	1,55 – 1,75	0,2	InSb
10	2,08 – 2,35	0,27	InSb
11	8,5 – 13,0	4,5	HgCdTe

Tabelle 2.2: Spektrale Auflösung des Daedalus AADS 1268

2.6.2 Spektrale Eigenschaften

Die Spektrale Auflösung und die Detektormaterialien des Daedalus AADS 1268-Scanners sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt. Demnach wird die Information über das Reflexionsvermögen der Objekte in den Kanälen 1–10 aufgezeichnet, während im Kanal 11 die Temperaturinformation gespeichert wird. Es ist noch ein zwölfter Kanal vorhanden, dessen Wellenlängenbereich mit dem des elften übereinstimmt.

Für die spätere Kalibration der Temperaturbilder ist auch die spektrale Gesamtfilterfunktion $F_G(\lambda)$ von Interesse. Diese ist das Produkt der Filterfunktionen der im Strahlengang vorhandenen optischen Elemente und der Ansprechfunktion des Detektors. Die integrale Strahldichte L_{int} am Sensor ist damit gegeben durch

$$L_{\text{int}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_G(\lambda) L(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_G(\lambda) d\lambda}. \tag{2.8}$$

Die letzte Eichung des Detektors fand im April 1997 statt. Die Filterfunktion des Kanals 12, die bei dieser Kalibration gemessen wurde, ist in Abbildung 2.6 dargestellt [Ama98].

2.7 Geometrische Korrekturen

Bei dem in der Gruppe „Physikalische Grundlagen der Fernerkundung“ verwendeten Datenmaterial handelt es sich um Bilder von einem flugzeuggetragenen Zeilenscanner. Bei dieser Art der Aufnahmetechnik kommt es aufgrund der Aufnahmegeometrie zu Verzerrungen, die man in begrenztem Rahmen vor der weiteren Verarbeitung rückgängig machen kann. Eine weitere Art der Korrektur ist

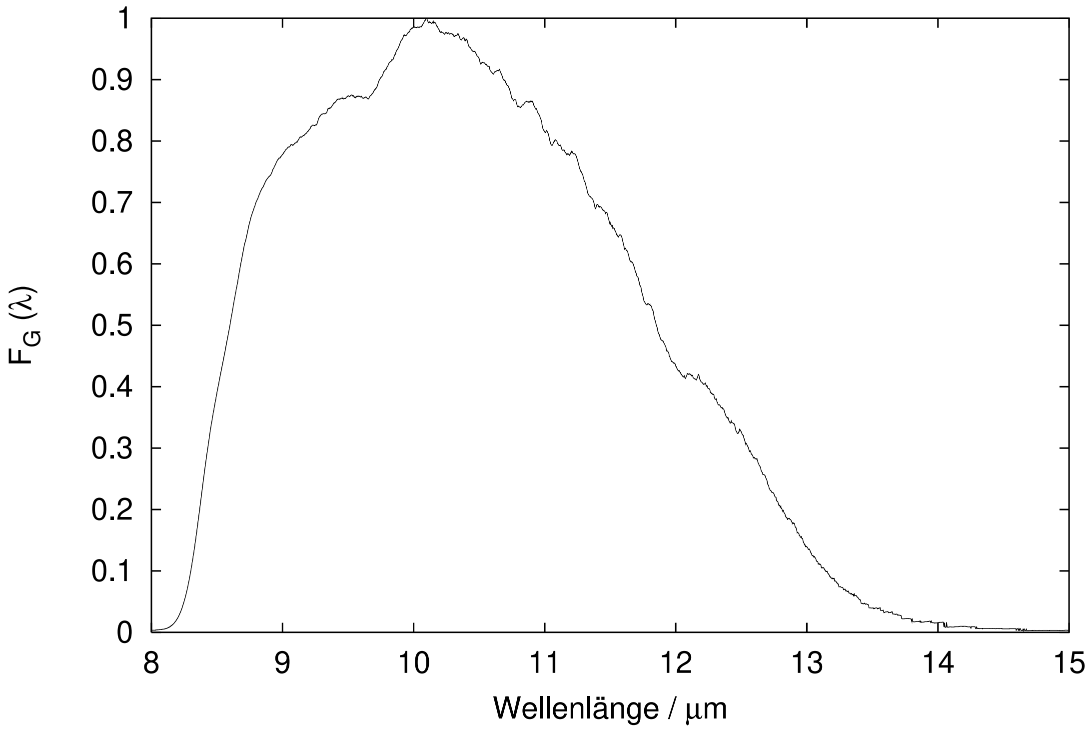
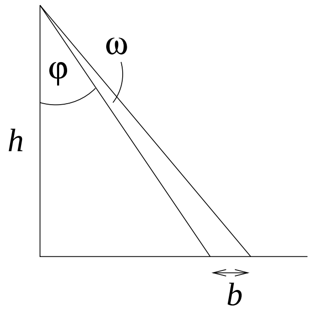


Abbildung 2.6: Spektrale Gesamtfilterfunktion $F_G(\lambda)$ für den Daedalus-Kanal 12, gemessen im April 1997. Die Funktion ist so skaliert, daß das Maximum bei 1 liegt. Quelle: [Ama98]

die Registrierung eines Bildes auf ein Referenzbild, d. h. auf eine Karte oder ein zweites Bild, das zu einer anderen Zeit aufgenommen wurde.

2.7.1 Panoramaentzerrung

Wie in Abbildung 2.5 zu sehen ist, wird das Licht, das vom Boden in den Detektor gelangt, von einem Spiegel reflektiert, der mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotiert. Der Sichtstrahl überstreicht so einen Winkelbereich von $\pm 43°$. Da der Öffnungswinkel der Teleskopoptik konstant ist, überdecken die Pixel am Rand eines Bildes (Scanwinkel 43°) eine größere Fläche als die im Nadir (Scanwinkel 0°).



Aus nebenstehender Geometrie (Flughöhe h, Scanwinkel φ, Öffnungswinkel ω) ergibt sich die Breite eines Flächenelements am Boden:

$$b = h[\tan(\varphi + \omega) - \tan \varphi] \qquad (2.9)$$

Mit $\omega = 0{,}12°$ ergibt sich für eine Flughöhe von 300 m im Nadir $b = 0{,}63$ m und beim Scanwinkel 43°: $b = 1{,}18$ m. Ein Flächenelement ist also am Bildrand etwa doppelt so breit wie in der Bildmitte. Die Pixel werden aber bei sämtlichen Bildbearbeitungsschritten als gleich breit angenommen, so daß dieser Effekt herausgerechnet werden muß. Die Pixel des Bildes müssen dazu neu aus den Grauwerten der am nächsten liegenden Gitterpunkte bestimmt werden (*resampling*). Grundsätzlich hat man hierbei die Wahl zwischen zwei Möglichkeiten:

Nächster Nachbar: Der Wert des am nächsten gelegenen Pixels wird übernommen. Das ist sinnvoll, wenn man keine neuen Grauwerte erhalten möchte, z. B. nach einer Klassifikation (es sollen keine neuen Klassen entstehen) oder bei Spektren, die möglichst unverändert bleiben sollen.

Interpolation: Der Wert wird aus den Werten der umliegenden Pixel interpoliert. Dies ist z. B. bei Temperaturbildern sinnvoll, da ein interpolierter Wert mehr der wahren Temperatur am gegebenen Punkt entspricht.

2.7.2 Registrierung

Sollen zwei Bilder zur Deckung gebracht werden, spricht man von Registrierung. Bei der Georeferenzierung wird z. B. ein Luftbild auf eine Karte registriert, die digital im Rechner vorliegt. Eine weitere Anwendung ist die Registrierung eines Bildes auf ein zu einem anderen Zeitpunkt aufgenommenes Bild. In beiden Fällen werden die gleichen Methoden angewandt.

Während bei Satellitenbildern oft eine globale Registrierung ausreichende Ergebnisse liefert, sind bei Luftbildern, die von einem flugzeuggetragenen Zeilenscanner aufgenommen wurden, lokale Verfahren besser geeignet. Der Grund dafür ist, daß Satelliten sehr stabilen Bahnen folgen, daher ist meist nur eine Skalierung und Rotation der Bilder notwendig. Scannerbilder aus Flugzeugen sind aber in sich verzerrt, da es immer zu Roll-, Gier- und Nickbewegungen des Flugzeugs kommt. Eine weitere Schwierigkeit ist, daß die Geschwindigkeit des Flugzeugs konstant gehalten werden muß. Andernfalls kommt es zum Ausfall, bzw. zur mehrfachen Aufnahme von Scanzeilen.

In der vorliegenden Arbeit wurde mit einem paßpunktgestützten Verfahren (*Bivariate Akima Interpolation*) gearbeitet, das in [Wie96] ausführlich beschrieben wird. Bei diesem Verfahren werden in beiden Bildern jeweils Paßpunkte gesetzt, die dann aufeinander abgebildet werden. Aus den Paßpunkten wird zunächst ein Netz aus Dreiecken erzeugt (Triangulation). Während die neuen Positionen der Eckpunkte schon durch die Paßpunkte festgelegt sind, werden die Punkte innerhalb eines Dreiecks durch Polynome fünften Grades bestimmt.

Wichtig bei diesem Verfahren ist, daß die Paßpunkte aufeinander abgebildet werden und die Registrierungsgenauigkeit durch Hinzufügen von Paßpunkten lokal verbessert werden kann.

2.8 Klassifikation von Multispektralbildern

Unter Klassifikation versteht man die Zuordnung von Elementen zu bestimmten Gruppen, die Klassen genannt werden. In der Auswertung von digitalen Fernerkundungsdaten ist damit gemeint, daß die Pixel eines Bildes definierten Bodenbedeckungstypen zugeordnet werden.

Bei multispektralen Luftbildern geschieht die Klassifikation meist im sogenannten Spektralraum. Jedes Pixel eines Multispektralbildes (definiert durch seine Position in der Bildmatrix) kann als N-dimensionaler Vektor von Grauwerten dargestellt werden, wobei N die Anzahl der Spektralkanäle ist. Man bezeichnet den so definierten Vektorraum als Spektralraum oder *Merkmalsraum*. Bildpunkte, die Materialien mit ähnlichen spektralen Eigenschaften abbilden, die also ein ähnliches Spektrum darstellen, liegen im Merkmalsraum dicht beieinander, sofern sie ähnlichen Beleuchtungsbedingungen unterliegen. Eine unterschiedliche Beleuchtung macht sich in erster Näherung dadurch bemerkbar, daß die Pixel entlang einer Geraden, die durch den Ursprung geht, verteilt sind.

Bei der Klassifikation wird nun versucht, die Pixel im Merkmalsraum bestimmten Klassenmittelpunkten zuzuordnen, die entweder iterativ bestimmt werden (unüberwachte Klassifikation) oder durch Trainingsgebiete vorgegeben werden (überwachte Klassifikation).

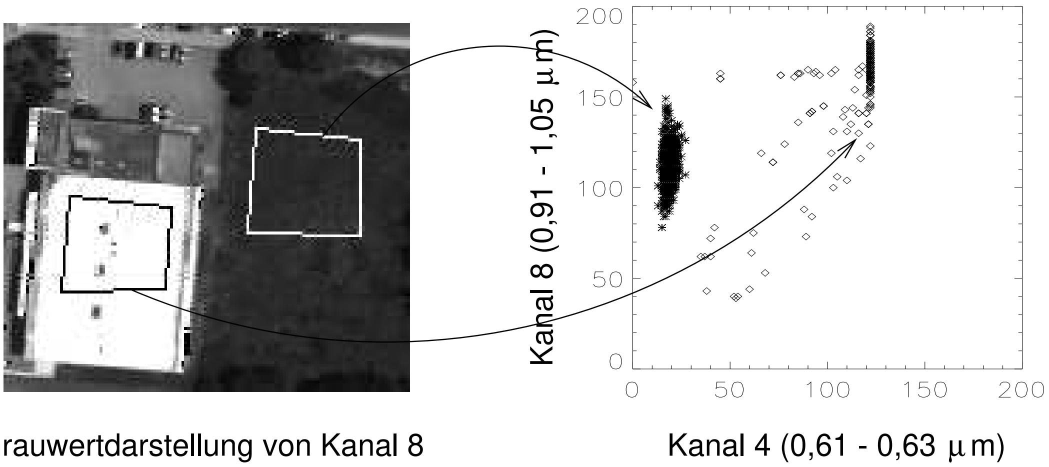


Abbildung 2.7: Veranschaulichung des Merkmalsraums. (Die Verteilung der Pixel des Daches im Kanal 4 deutet auf eine Übersteuerung des Sensors hin)

2.8.1 Überwachte Klassifikation

Die überwachte Klassifikation (engl. *supervised classification*) beruht darauf, daß ein menschlicher Klassifikator einen Teil des Bildes klassifiziert, indem er Test- oder Trainingsgebiete festlegt, die für die Klassen repräsentativ sind. Aus den Pixeln dieser Trainingsgebiete werden die spektralen Eigenschaften der jeweiligen Klasse abgeleitet, nach denen dann der Rest des Bildes klassifiziert wird.

Als Beispiel sei Abbildung 2.7 betrachtet. Der Benutzer des Klassifikationsprogramms hat zwei Polygone definiert, die die Trainingsgebiete für die Klassen „Dach“ und „Wiese“ sein sollen. Im Merkmalsraum (aufgetragen ist Kanal 8 gegen Kanal 4) kann man deutlich die Clusterbildung der Pixel erkennen. Jeder Punkt im Merkmalsraum entspricht einem Pixel im Mehrkanalbild.

Durch Mittelwertbildung der N_i zum Gebiet i gehörenden Grauwerte $\vec{x}_{k,i}$ erhält man die Schwerpunkte $\vec{m}_{\omega_i}$ der Klassen ω_i, bzw. die Clusterzentren:

$$\vec{m}_{\omega_i} = \frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} \vec{x}_{k,i}.$$

Nun müssen die restlichen Bildpixel auf die gewählten Klassen aufgeteilt werden. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze.

Kürzeste Entfernung: Die einfachste Möglichkeit der Zuordnung besteht darin, für jedes Pixel den Abstand zu allen Klassenschwerpunkten im Merkmalsraum zu berechnen und diejenige Klasse zu wählen, für die der Abstand minimal ist. Dieses auch *minimum distance* genannte Verfahren beruht auf der Berechnung des euklidischen Abstands

$$d(\vec{x},\vec{m}) = \sqrt{(x_1 - m_1)^2 + \ldots + (x_N - m_N)^2},$$

obwohl es auch möglich wäre, ein anderes Abstandsmaß zu verwenden.

Der Nachteil der Klassifizierung aufgrund des kürzesten Abstands ist die fehlende Berücksichtigung der statistischen Verteilung der Pixel. In der Praxis besitzen die Punktwolken der Trainingsgebiete im Merkmalsraum sehr unterschiedliche Streuungen. Dies ist auch schon an der unterschiedlichen Breite der Cluster in Abbildung 2.7 zu erkennen.

Maximale Wahrscheinlichkeit: Das *maximum likelihood*-Verfahren basiert auf Bayesschen Wahrscheinlichkeiten und berücksichtigt auch die Verteilung der Pixel im Merkmalsraum um den Klassenschwerpunkt. Besonders die Streuung aufgrund von unterschiedlicher Beleuchtung kann dadurch ausgeglichen werden. Wenn man die Klassen mit ω_i bezeichnet, lautet die Zuweisungsvorschrift

$$\vec{x} \in \omega_i \qquad \text{wenn} \qquad p_i(\vec{x}) > p_j(\vec{x}) \qquad \text{für alle} \quad j \neq i \ ,$$

wobei $p_i(\vec{x})$ die Wahrscheinlichkeitsdichte der Klasse ω_i am Ort $\vec{x}$ im Merkmalsraum ist. Die Wahrscheinlichkeitsdichte ist z. B. in [Ric93] abgeleitet als

$$p_i(\vec{x}) = -\ln|\Sigma_i| - (\vec{x}-\vec{m}_i)^t \Sigma_i^{-1} (\vec{x}-\vec{m}_i) \ . \qquad (2.10)$$

Dabei ist $\vec{m}_i$ der Mittelpunkt und Σ_i die Kovarianz-Matrix der Trainingspixel in Klasse ω_i.

Für den eindimensionalen Fall ist die Entscheidung, zu welcher Klasse (ω_1 oder ω_2) ein Pixel gehört, in Abbildung 2.8 veranschaulicht.

Ein systematischer Vergleich der beiden häufig verwendeten Verfahren zur Klassifikation, *minimum distance* und *maximum likelihood*, wurde z. B. von

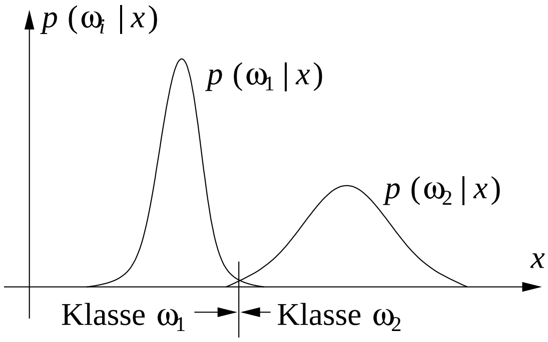


Abbildung 2.8: Veranschaulichung der Klassifikation nach dem *maximum likelihood*-Verfahren in einer Dimension

[Kul97] durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, daß das *maximum likelihood*-Verfahren mit Reflektanzdaten des Daedalus in städtischen Gebieten etwa 5% besser klassifiziert.

2.8.2 Unüberwachte Klassifikation

Bei den Verfahren der unüberwachten Klassifikation werden die Klassenzentren im Merkmalsraum von Algorithmen gefunden. Als Beispiel sei das *migrating means*-Verfahren betrachtet [Ric93]. Wie bei den meisten unüberwachten Verfahren wird als Eingabeparameter die Zahl der Klassen benötigt. In einem ersten Schritt wird für jede Klasse ein zufälliger Punkt im Merkmalsraum als Mittelpunkt gewählt. Jedes Pixel wird dann derjenigen Klasse zugeordnet, zu deren Mittelpunkt es den kleinsten Abstand im Merkmalsraum hat. Für jede Klasse kann dann ein neuer Schwerpunkt berechnet werden. Danach werden alle Pixel erneut den Klassenmittelpunkten zugeordnet. Diese beiden Schritte werden iterativ so lange wiederholt, bis keine Änderung in der Zuordnung mehr auftritt oder die Anzahl der anders klassifizierten Pixel kleiner ist als ein vorgegebener Schwellwert.

2.8.3 Wissensbasierte Klassifikation

Bei der wissensbasierten Klassifikation ergeben sich die Merkmale der Klassen nicht aus den Daten selbst, sondern sie werden schon als bekannt vorausgesetzt. Es muß eine Wissensbasis in Form von Regeln oder einer Datenbank vorhanden sein. Die besten Resultate liefert der wissensbasierte Ansatz, wenn auf Daten verschiedener Sensorsysteme zurückgegriffen werden kann. Oft wird das Wissen in Form von Regeln abgelegt. In [Ric93] findet sich das folgende Beispiel:

> Ein Landsat MSS-Bild soll in die drei Klassen „Vegetation“, „Wasser“ und „Anderes“ aufgeteilt werden. Der Satz von Regeln könnte lauten:
>
> **wenn** Band 7/Band 5 > Schwellwert **dann** Vegetation
> **wenn** Band 7/Band 4 < 1 **dann** Wasser
> **wenn nicht** (Wasser) **und nicht** (Vegetation) **dann** Anderes

An diesem Beispiel wird deutlich, daß bei der wissensbasierten Klassifikation oft Parameter, wie z. B. Schwellwerte benötigt werden. Diese sind fast immer szenenabhängig, so daß wiederum der Benutzer eingreifen muß, indem er einen Wert vorgibt. Denkbar wäre auch die Vorgabe eines Trainingsgebietes, aus dem der Schwellwert abgeleitet werden kann.

2.9 Bestimmung der Klassifikationsgenauigkeit

Zur Bestimmung der Genauigkeit einer Klassifikation benötigt man zunächst eine Karte des klassifizierten Gebietes, die jede Fläche auf dem Boden einer Klasse zuordnet (*ground truth*). Im idealen Fall ist diese Karte durch Verifikation vor Ort entstanden. Wenn dies nicht möglich ist, müssen die Daten selbst benutzt werden, eventuell sind weitere Aufnahmen (z. B. Farbinfrarot-Luftbilder) vorhanden, die zur Klassifikation in Zweifelsfällen herangezogen werden können. Die *ground truth* muß möglichst genau sein, daher ist es unumgänglich, daß ein menschlicher Klassifikator die Klassifikation vornimmt. Eine Möglichkeit besteht darin, daß ein Gebiet überwacht klassifiziert wird und der Benutzer die fehlklassifizierten Flächen von Hand berichtigt.

2.9.1 Konfusionsmatrizen

Wenn zwei Bilder klassifiziert werden, kann die Übereinstimmung der beiden Klassifikationen durch eine Konfusionsmatrix beschrieben werden [Ric93, Con91]. Als Beispiel sei die folgende Matrix angegeben ($N = 3$ Klassen A, B, C):

		Klassen im Referenzbild			
		A	B	C	Σ
Klassen	A	65	4	22	91
im zu beurteil-	B	6	81	5	92
enden Bild	C	0	12	85	97
	Σ	71	97	112	280

Die Elemente X_{ij} der mittleren 3×3-Matrix geben jeweils die Anzahl der Pixel an, die im zu beurteilenden Bild der Klasse i und im Referenzbild der Klasse j zugeordnet wurden. Demzufolge geben die Diagonalelemente der Konfusionsmatrix die Anzahl der „richtig" klassifizierten Pixel an. In der letzten Zeile bzw. Spalte sind die jeweiligen Spalten- bzw. Zeilensummen eingetragen. Die Gesamtzahl der Pixel beträgt im obigen Beispiel 280.

Die einfachste Eigenschaft, die aus einer Konfusionsmatrix abgeleitet werden kann, ist die Gesamtgenauigkeit, die gegeben ist durch das Verhältnis der Summe aller korrekt klassifizierten Pixel (Diagonalelemente) zu der Gesamtzahl M der Pixel:

$$p_0 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{N} X_{ii} = (65 + 81 + 85)/280 = 83\% \tag{2.11}$$

Wenn man an den auf die Klassen bezogenen Genauigkeiten interessiert ist, hat man zunächst zwei Möglichkeiten:

1. Die Anzahl der Pixel, die korrekt einer Klasse zugeordnet wurden, wird durch die Spaltensumme geteilt. Dieses Verhältnis gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der Pixel einer bestimmten Referenzklasse richtig zugeordnet wurden. Es wird als Wiedererkennungsgenauigkeit (engl. *producer's accuracy*) bezeichnet, da der Klassifikator daran interessiert ist, mit welcher Genauigkeit er die Pixel einer Klasse korrekt klassifizieren kann. Für das obige Beispiel erhält man:

$$p_{\text{prod}}(i) = \frac{X_{ii}}{\sum\limits_j X_{ji}} = \begin{cases} A: & 65/71 & = & 92\% \\ B: & 81/97 & = & 84\% \\ C: & 85/112 & = & 76\% \end{cases}$$

2. Teilt man ein Diagonalelement durch die Zeilensumme, so erhält man die Zuweisungsgenauigkeit (engl. *user's accuracy*). Sie gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmtes Pixel, das einer Klasse x zugeordnet wurde, auch tatsächlich zur Klasse x gehört. Diese Genauigkeit ist für den Endbenutzer der Karte wichtiger als die Wiedererkennungsgenauigkeit. Man erhält so

$$p_{\text{user}}(i) = \frac{X_{ii}}{\sum\limits_j X_{ij}} = \begin{cases} A: & 65/91 & = & 71\% \\ B: & 81/92 & = & 88\% \\ C: & 85/97 & = & 88\% \end{cases}$$

Für das obige Beispiel bedeutet diese Unterscheidung: Obwohl der Klassifikator behaupten kann, daß er 92% der Pixel in Klasse A korrekt klassifiziert hat, muß der Benutzer der Karte feststellen, daß er nur an 71% der Flächenelemente, für die die Karte Klasse A angibt, auch tatsächlich Klasse A vorfindet.

2.9.2 Der κ-Wert

Um die Genauigkeit einer Klassifizierung mit einer einzigen Zahl beschreiben zu können, wurde der κ-Wert eingeführt [Con91], welcher definiert ist durch:

$$\kappa = \frac{p_0 - p_z}{1 - p_z} ,$$

wobei p_0 die Gesamtgenauigkeit nach Gl. (2.11) und p_z der Anteil der zufällig richtig zugeordneten Pixel ist:

$$p_z = \frac{1}{N^2} \sum_i \left(\sum_j X_{ij} \cdot \sum_j X_{ji} \right) .$$

Der Grund für die Subtraktion von p_z ist, daß man auch bei einer rein zufälligen Zuordnung der Pixel auf die Klassen eine Gesamtgenauigkeit erhält, die größer

	Beispielmatrix	κ-Wert	Beschreibung
a)	$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}$	$\left.\begin{matrix} p_0 = \frac{1}{3} \\ p_z = \frac{1}{3} \end{matrix}\right\} \kappa = 0$	Völlig gleichmäßige Zuordnung
b)	$\begin{matrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{matrix}$	$\left.\begin{matrix} p_0 = 1 \\ p_z = \frac{1}{3} \end{matrix}\right\} \kappa = 1$	Perfekte Klassifikation
c)	$\begin{matrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 \end{matrix}$	$\left.\begin{matrix} p_0 = 0 \\ p_z = \frac{1}{3} \end{matrix}\right\} \kappa = -\frac{1}{2}$	Zuordnung schlechter als „Zufall“

Tabelle 2.3: Einige Konfusionsmatrizen und κ-Werte

κ-Wert	Qualität
$< 0{,}0$	Sehr schlecht
0,0 bis 0,2	Schlecht
0,2 bis 0,4	Akzeptabel
0,4 bis 0,6	Gut
0,6 bis 0,8	Sehr Gut
0,8 bis 1,0	Ausgezeichnet

Tabelle 2.4: Bewertung von κ-Werten nach [OFE97]

als Null ist. Der κ-Wert wird in diesem Fall aber Null, wie Beispiel a) der Tabelle 2.3 zeigt. An Beispiel b) der Tabelle sieht man, daß auch ein negativer κ-Wert vorkommen kann, wenn nämlich die Klassifikation schlechter ist als eine gleichmäßige Zuordnung.

Eine Bewertung der κ-Werte wurde von [OFE97] wie in Tabelle 2.4 dargestellt vorgenommen.

3 Datengewinnung

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Daten und ihre Messung beschrieben. Es handelt sich dabei hauptsächlich um die in der Umgebung des Flughafens von Nürnberg aufgenommenen multispektralen Luftbilder und um Temperaturdaten, die mit Thermoelementen gleichzeitig mit den Überfliegungen gemessen wurden.

3.1 Beschreibung des Datenmaterials

Der größte Teil des Datenmaterials, das für diese Arbeit verwendet wurde, wurde am 26. August 1997 in Nürnberg und Umgebung aufgenommen. Die Überfliegung wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Auftrag der Universität Hamburg durchgeführt.

Es wurden Daten aus 300 m und aus 900 m Höhe aufgenommen. Die entsprechenden Auflösungen sind gemäß Gleichung (2.9) 0,63 – 1,18 m für 300 m Flughöhe, bzw. 1,88 – 3,53 m für 900 m Flughöhe. Die Breite eines Flugstreifens berechnet sich nach

$$B = 2h \tan 43°,$$

damit ist ein Flugstreifen 560 m, bzw. 1679 m breit.

In Tabelle 3.1 sind die Aufnahmezeiten aller am 26. August 1997 in Nürnberg durchgeführten Überfliegungen aufgeführt. Bei der ersten Überfliegung wurde nur die Temperatur aufgezeichnet, da es zu dieser Zeit noch dunkel war. Bei allen restlichen Meßflügen wurden alle Kanäle des Daedalus verwendet. Die Lage der Flugstreifen T1 bis T11, bzw. S1 bis S6 ist in Abb. 3.1 verzeichnet.

Bei einigen Flügen wurden parallel zur Scanneraufnahme Luftfotos mit Farbinfrarot-Filmen aufgenommen. Auf einem Farbinfrarot-Film erscheinen grüne Objekte blau und rote Objekte grün. Vegetation erscheint rot, da der nahe Infrarotbereich auf Rot abgebildet wird. Die Luftfotos besitzen eine wesentlich höhere Auflösung als der Scanner. Daher können sie in Zweifelsfällen zur Beurteilung einer Klassifikation herangezogen werden.

Beginn [MEZ]	Ende [MEZ]	Flughöhe	Flugstreifen
4:25	5:02	900 m	S1–S6
7:57	8:50	300 m	T1–T11
11:22	11:48	900 m	S1–S6
12:00	12:51	300 m	T1–T11

Tabelle 3.1: Überfliegungen am 26. August 1997 in Nürnberg

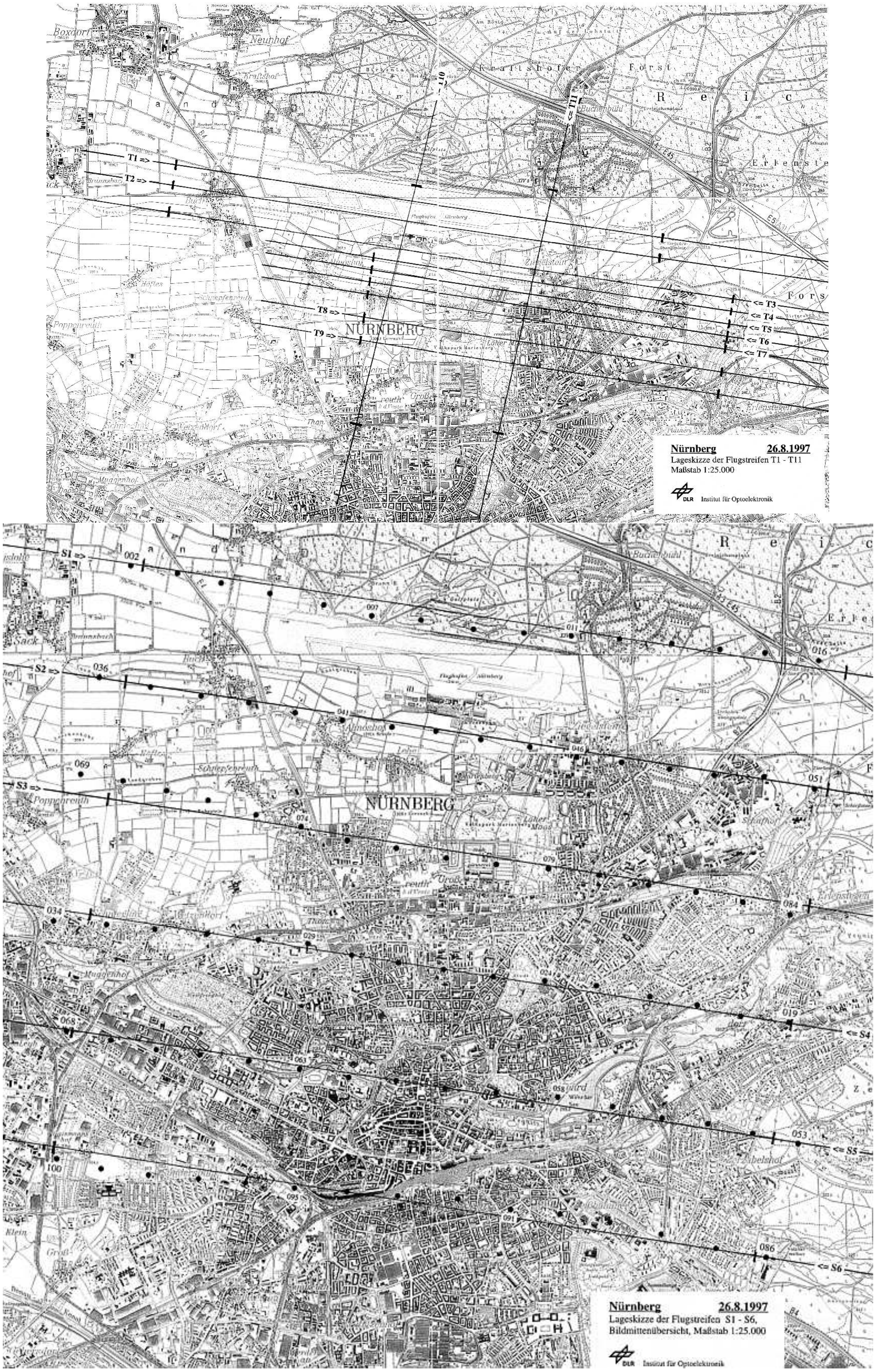


Abbildung 3.1: Die Lage der Flugstreifen T1 bis T11 und S1 bis S6

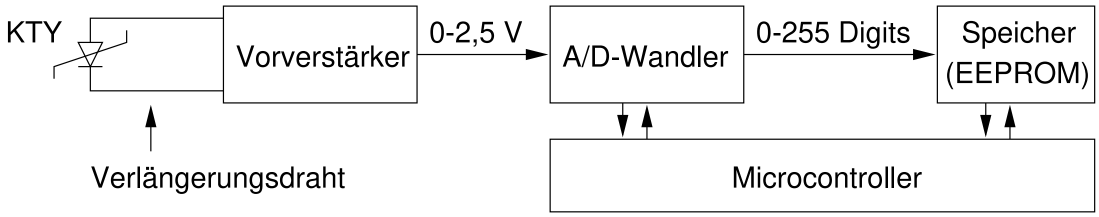


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau der Aufzeichnungeinheit

3.2 Bodenmessungen

Parallel zu der Überfliegung wurden Bodenmessungen von Temperaturen durchgeführt. Dazu wurden die kinetischen Oberflächentemperaturen einiger Flächen mit Thermoelementen gemessen. Außerdem wurden Strahlungstemperaturen mit einem handgehaltenen Meßgerät bestimmt.

3.2.1 Konstruktion und Kalibration von Temperaturaufzeichnungsgeräten

Die Aufzeichnungsgeräte für Bodentemperaturen wurden im Rahmen dieser Arbeit konzipiert und geeicht. Sie sollten über einen Zeitraum von einem Tag autonom die Oberflächentemperaturen von verschiedenen Materialien messen können. Dazu wurden fünf Microcontroller-Einheiten (C-Control) verwendet, die mit einem Thermoelement ausgestattet werden konnten.

Der schematische Aufbau der Aufzeichnungeinheiten ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Ein Thermoelement der KTY-Familie ist mit einem Vorverstärker in einem Sensormodul zusammengefaßt. Dieses Modul muß mit einer Betriebsspannung von 6,5 Volt versorgt werden und liefert eine Ausgangsspannung von 0,0 bis 2,5 Volt, entsprechend einer Temperatur im Bereich $-27{,}5$ °C bis $+100{,}0$ °C. Die Toleranz des Sensormoduls beträgt $\pm 1\%$. Der programmierbare Microcontroller steuert den A/D-Wandler, der aus dem analogen Signal des Sensormoduls einen 8-Bit-Wert aus dem Wertebereich 0–255 erzeugt. Dieser kann zu bestimmten Zeiten, die der Microcontroller festlegt, in einem EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory[1]) gespeichert werden.

Um die Sensormodule sinnvoll einsetzen zu können, mußten sie modifiziert werden. Die Dioden, die in thermischen Kontakt mit dem Boden gebracht werden sollten, mußten dazu aus der Platine des Sensorvorverstärkers ausgelötet und über einen Verlängerungsdraht wieder angeschlossen werden. Da hierdurch die elektrischen Eigenschaften des Schaltkreises verändert wurden, wurde es für sinnvoll gehalten, die Sensoreinheiten neu zu kalibrieren. Das Ergebnis einer Kalibration ist eine Tabelle, die jedem Digitalwert (0–255) eine Temperatur zuordnet.

[1] laut `http://www.chemie.fu-berlin.de/cgi-bin/acronym`

Aufzeichnungseinheit	a_0/°C	a_1/°C	a_2
1	-37,4 $\pm$ 0,4	2,20 $\pm$ 0,05	0,746 $\pm$ 0,003
2	-35,5 $\pm$ 0,6	2,00 $\pm$ 0,08	0,761 $\pm$ 0,006
3	-36,4 $\pm$ 0,7	2,06 $\pm$ 0,09	0,756 $\pm$ 0,007
4	-33,8 $\pm$ 0,8	1,76 $\pm$ 0,08	0,778 $\pm$ 0,008
5	-34,9 $\pm$ 0,6	1,89 $\pm$ 0,07	0,770 $\pm$ 0,006

Tabelle 3.2: Die Parameter der Kalibrationsfunktion $T = a_0 + a_1 DN^{a_2}$

Die Kalibration wurde durch ein in der Temperatur regelbares Wasserbad realisiert. Das hierfür verwendete Gerät[2] war mit Glasröhrchen ausgestattet, über die die Thermoelemente und ein Digitalthermometer, das als Referenz diente, mit dem Wasser in thermischen Kontakt gebracht werden konnten. Da ein direktes Auslesen der Daten über die serielle Schnittstelle nicht möglich war, wurden die Aufzeichnungseinheiten so programmiert, daß sie alle 10 Sekunden einen Wert speicherten. Die Meßwerte des Referenz-Digitalthermometers wurden synchron per Hand aufgezeichnet.

Um die Trägheit der Sensoren nicht ins Gewicht fallen zu lassen, wurde jeweils eine Temperatur über längere Zeiträume konstant gehalten (in Schritten von 5 °C). Die Zwischenwerte beim Anstieg der Temperatur wurden dann nach der Messung wieder herausgefiltert. Dazu wurden nur Meßwerte zur Kalibration verwendet, bei der der vom Digitalthermometer gemessenen Wert dreimal hintereinander identisch war.

Die Abbildungen 3.3 bis 3.7 zeigen die Meßpunkte jeweils zusammen mit einer Funktion der Form

$$T = a_0 + a_1 DN^{a_2},$$

wobei T die Temperatur und DN der vom Datenlogger aufgezeichnete 8-Bit-Digitalwert ist. Die Funktion wurde jeweils mit einem *non-linear least square fit* bestimmt.

Die sich ergebenden Funktionsparameter sind in Tabelle 3.2 zusammengestellt. Sie erlauben für jede Aufzeichnungseinheit die Berechnung der gemessenen Temperatur aus dem aufgezeichneten diskreten Wert.

Fehlerabschätzung

Der Vorverstärker des Thermoelements liefert eine Spannung von 0,0 bis 2,5 V, entsprechend einer Temperatur von $-27{,}5$ °C bis $+100{,}0$ °C. Der Meßfehler des Thermoelements (inkl. Vorverstärker) wird vom Hersteller mit einem Prozent des Maximalwertes angegeben, d. h. die Spannung, die dem A/D-Wandler zugeführt

[2] Freundlicherweise vom Praktikum des I. Instituts für Experimentalphysik der Universität Hamburg zur Verfügung gestellt.

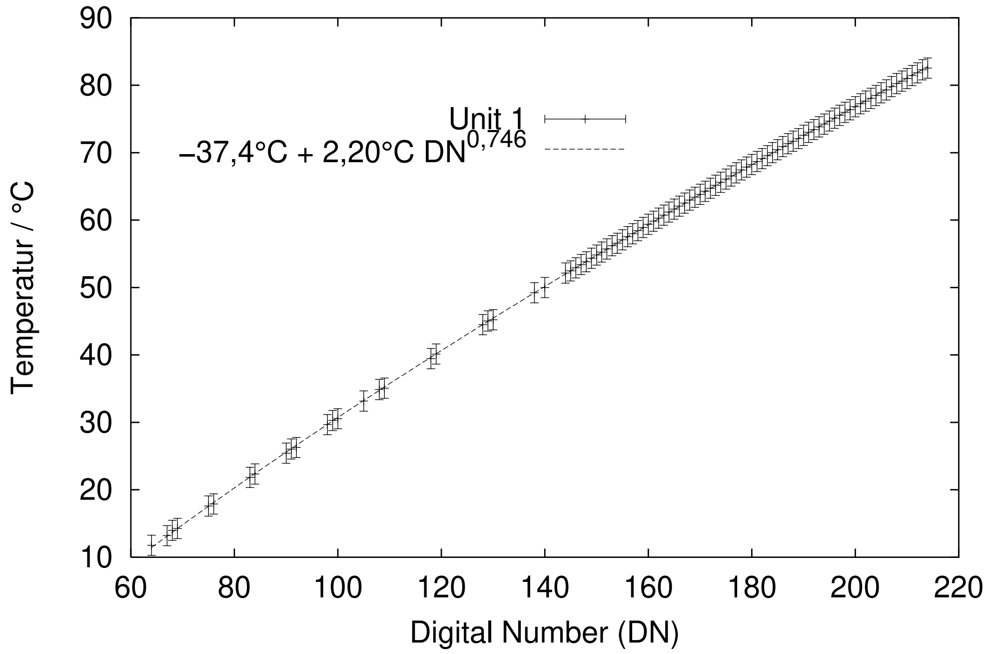


Abbildung 3.3: Kalibration der Aufzeichnungseinheit 1

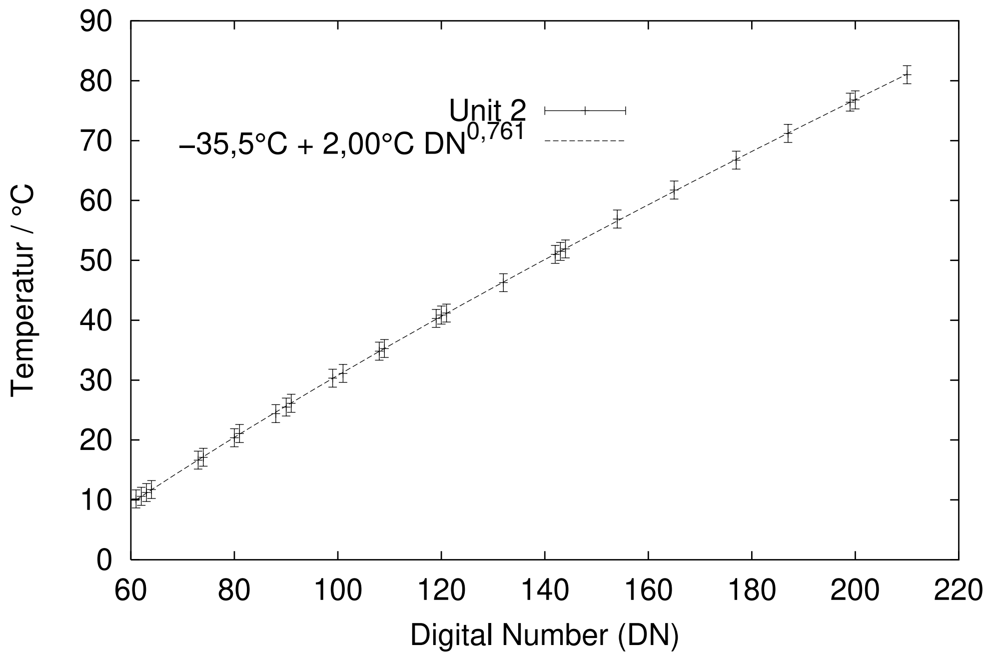


Abbildung 3.4: Kalibration der Aufzeichnungseinheit 2

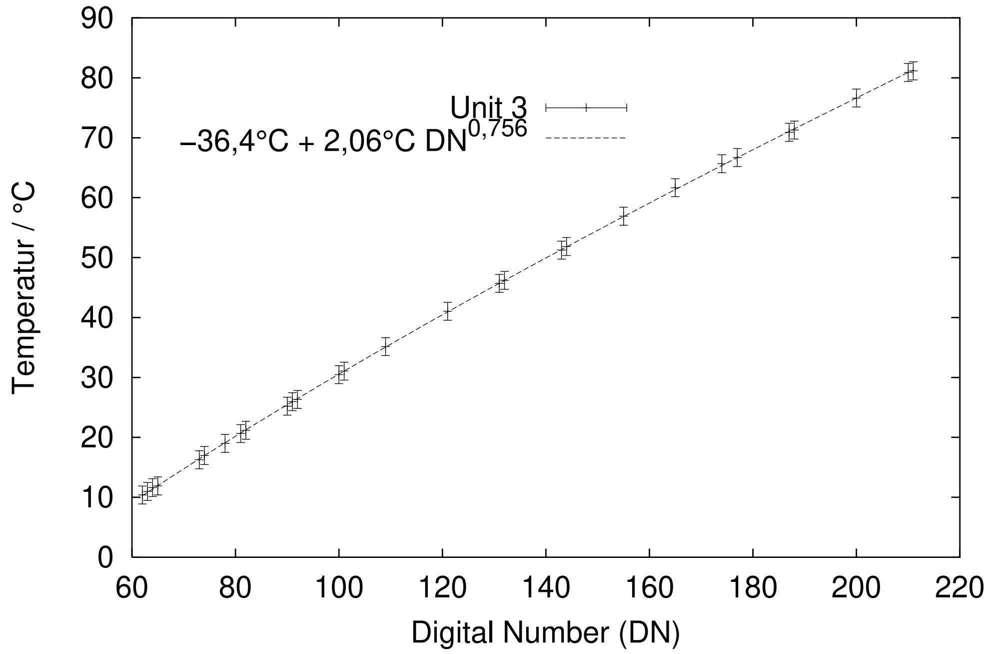


Abbildung 3.5: Kalibration der Aufzeichnungseinheit 3

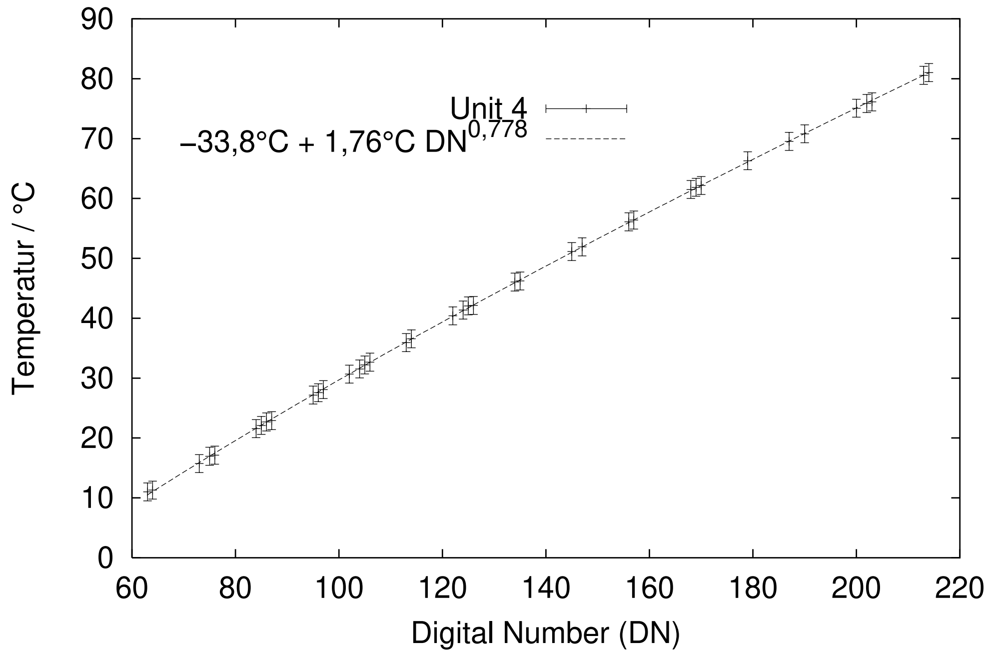


Abbildung 3.6: Kalibration der Aufzeichnungseinheit 4

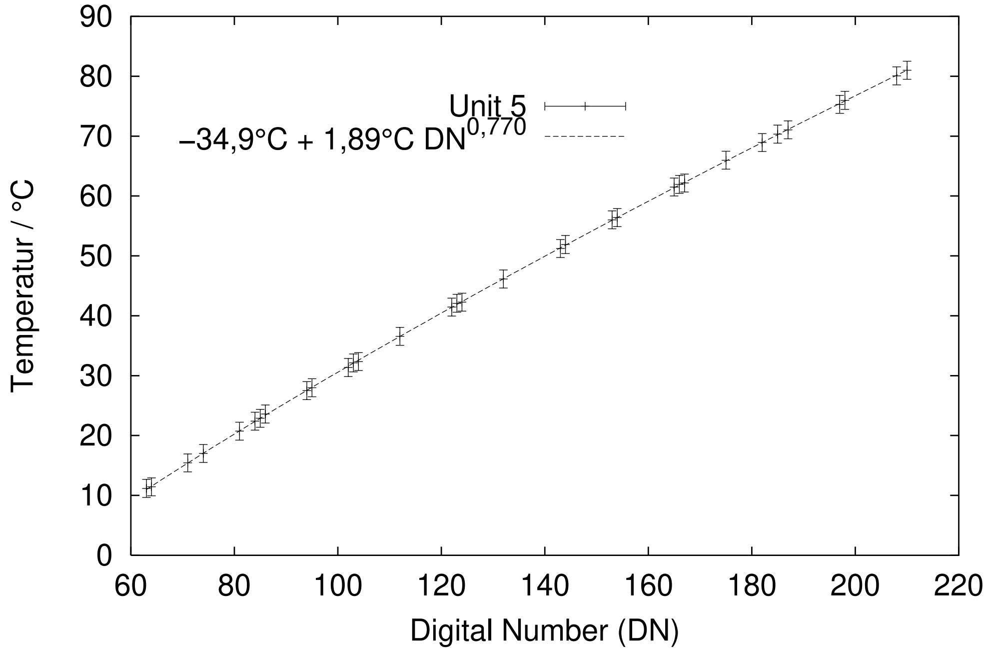
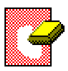


Abbildung 3.7: Kalibration der Aufzeichnungseinheit 5

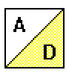
wird, ist mit einem Fehler von ±0,025 V behaftet, was ±1,275 °C entspricht. Dazu kommt noch der Fehler durch die Digitalisierung, der als $\pm\frac{1}{2}$ Digit angenommen wird. Bei 8 Bit Auflösung und einem Meßbereich von −27,5 °C bis +100,0 °C beträgt dieser Fehler ±0,25 °C. Angesichts dieses Gesamtfehlers von ca. ±1,5 °C ist der Fehler des Referenz-Digitalthermometers von 0,1 °C sicher zu vernachlässigen.

Programmierung des Microcontrollers

Der Microcontroller C-Control ist über eine serielle Schnittstelle an einen PC anschließbar. So kann Programmcode eingelesen, bzw. es können die Daten ausgelesen werden. Es wird ein Programm mitgeliefert, mit dem sich Blockdiagramme erstellen lassen, die den Programmablauf in der Control-Unit festlegen. Abbildung 3.8 zeigt das Programm, das zur Temperaturaufzeichnung verwendet wurde. Die folgenden Blöcke wurden verwendet:



Daten löschen: Dieser Block besitzt einen Eingang, der das Löschen des Datenspeichers des Microcontrollers veranlaßt. Zu Beginn der Aufzeichnung muß diese Funktion einmal ausgeführt werden.



A/D-Wandler: Dieser Block wird auf einen bestimmten analogen Port eingestellt und gibt den gewandelten digitalen Wert aus. In diesem Fall ist der

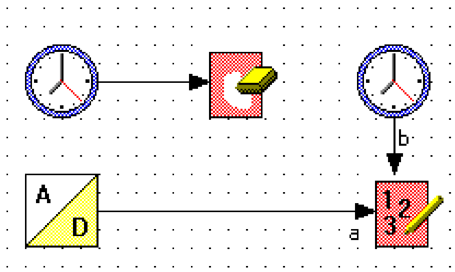
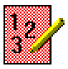
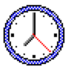


Abbildung 3.8: Blockdiagramm des Programms zur Temperaturdatenaufzeichnung. Beschreibung siehe Text

Port, an dem das Thermoelement angeschlossen ist, eingestellt.



Datenaufzeichnung: Dieser Block besitzt einen Eingang für diskrete Werte (die aufzuzeichnenden Daten) und einen logischen Eingang. Ein Signal am logischen Eingang veranlaßt das Speichern eines Meßwerts.



Zeitgeber: Dieser Block legt ein Signal an seinen logischen Ausgang, falls eine bestimmte einstellbare zeitliche Bedingung erfüllt ist. Im vorliegenden Fall ist dies die Zeit „3 Sekunden nach dem Einschalten“ (Daten löschen), bzw. „jede Minute“ (Meßwert aufzeichnen).

3.2.2 Kalibration eines Strahlungstemperaturmeßgerätes

Zur Temperaturmessung stand ein Strahlungstemperaturmeßgerät (Minolta/Land Cyclops Compac 3) zur Verfügung. Dieses hat einen Meßbereich von -50 bis $+500$ °C und ist im Spektralbereich von 8 bis 14 μm empfindlich. Der Meßfehler dieses Gerätes ist allerdings wesentlich größer als der der Thermoelemente. Laut Bedienungsanleitung (und Nachfrage beim Hersteller) ist die Ungenauigkeit des Meßgerätes $\pm 1\%$ des Temperaturwerts, bezogen auf den absoluten Temperaturnullpunkt, d. h. bei 20 °C beträgt die Ungenauigkeit ungefähr ± 3 °C.

Dennoch wurde versucht, das Strahlungstemperaturmeßgerät zu kalibrieren. Dazu dienten wiederum das Wasserbad und das Digitalthermometer. Als Emissivität des Wassers wurde $\epsilon_{\mathrm{H_2O}} = 0{,}955$ angenommen. Es wurde in Schritten von 2,5 °C jeweils zehn mal die Strahlungstemperatur des Wassers bestimmt. Als Referenz kann die kinetische Temperatur des Wassers herangezogen werden, die das Digitalthermometer mißt. Aus der kinetischen Temperatur läßt sich dann mit der Emissivität (Gl. (2.3)) und der Planckschen Strahlungsformel (Gl. (2.1)) die Strahlungstemperatur $T_{\mathrm{SK,H_2O}}$ (bei $\lambda = 10$ μm) berechnen. In Abbildung 3.9 ist die gemessene Strahlungstemperatur T_{Cycl} gegen diese so berechnete aufgetragen. Es ergibt sich ein linearer Verlauf, der durch die Gerade

$$T_{\mathrm{Cycl}} = (3{,}3 \pm 0{,}2)\ ^\circ\mathrm{C} + (1{,}061 \pm 0{,}006) \cdot T_{\mathrm{SK,H_2O}}$$

beschrieben werden kann.

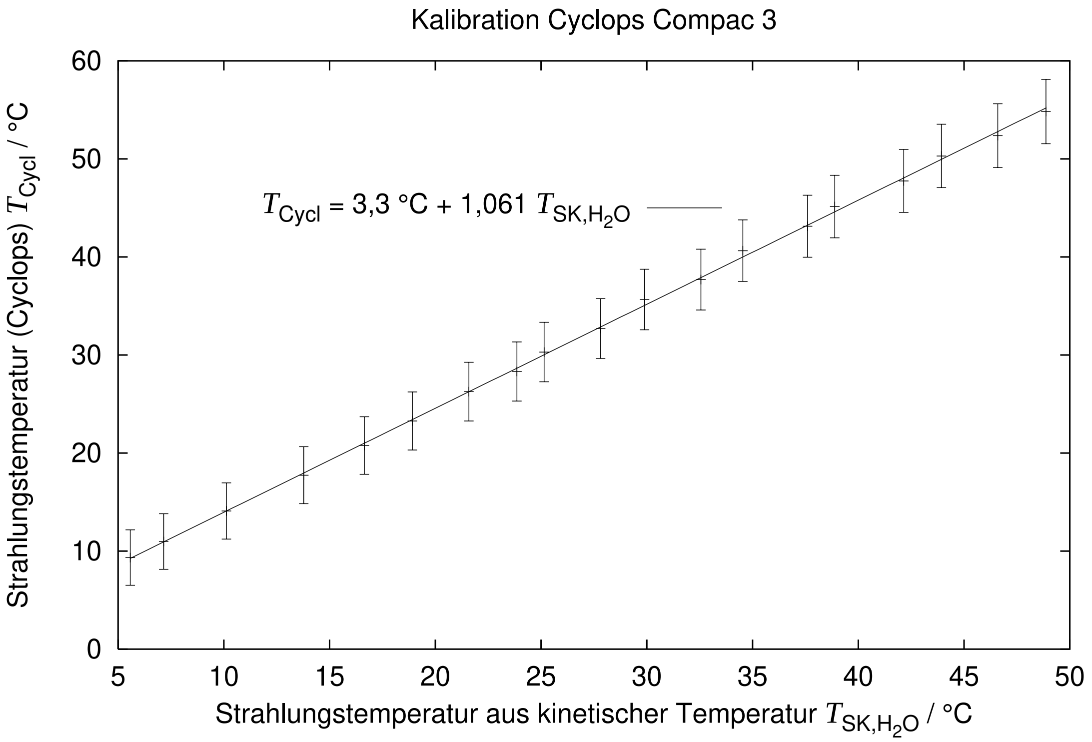


Abbildung 3.9: Kalibration des Strahlungstemperaturmeßgerätes mit Wasser ($\epsilon_{\mathrm{H_2O}} = 0,955$). Die Fehlerbalken geben die quadratische Summe aus der Meßunsicherheit des Cyclops und der Standardabweichung der jeweils zehn Messungen an

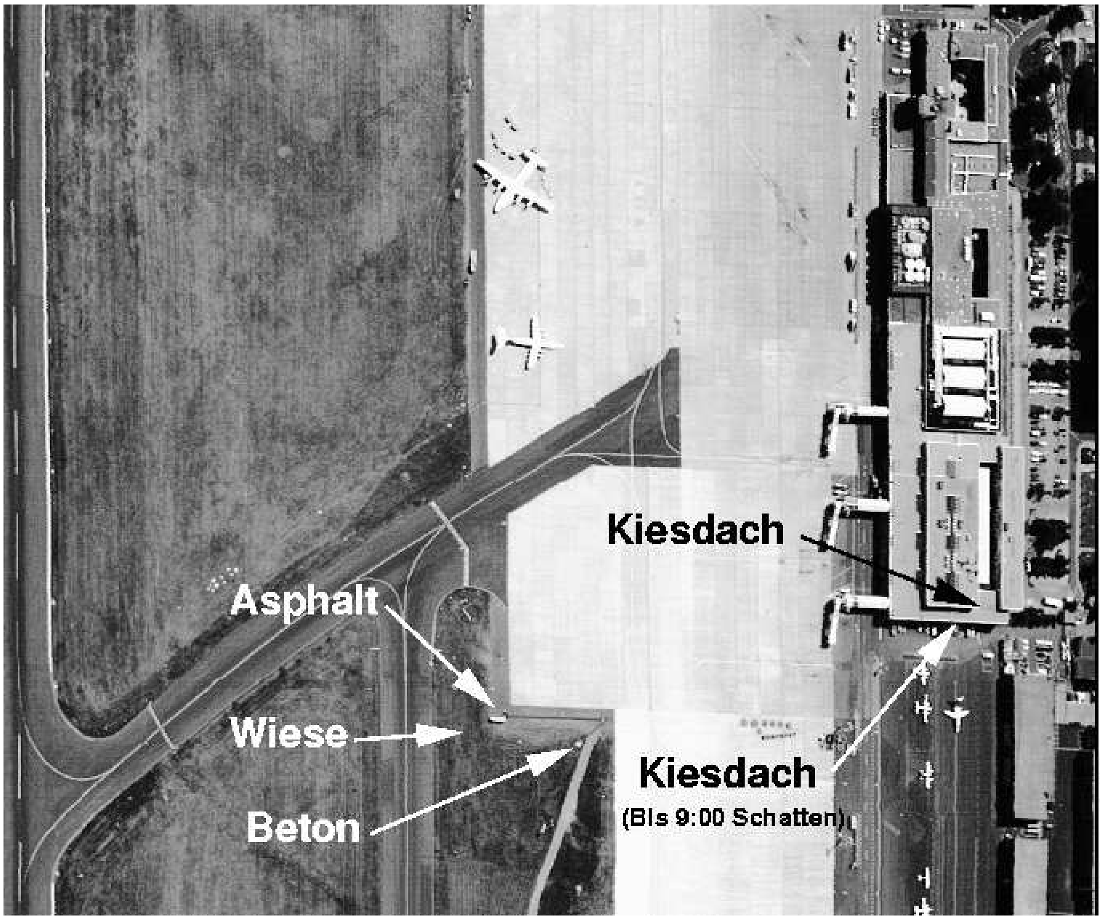


Abbildung 3.10: Meßpunkte der Aufzeichnungeinheiten am Nürnberger Flughafen

3.2.3 Temperaturmessungen am Nürnberger Flughafen

Die fünf Aufzeichnungeinheiten wurden am Vortag der Überfliegung um 16 Uhr am Nürnberger Flughafen installiert. Über einen Zeitraum von 24 Stunden wurde jede Minute ein Temperaturwert aufgezeichnet. Diese Frequenz wurde aufgrund des Speicherplatzes von 8 kB gewählt. Abbildung 3.10 zeigt das Empfangsgebäude des Flughafens, das Vorfeld und die Stellen, an denen die Aufzeichnungeinheiten ausgelegt wurden. Bei der Betonfläche handelt es sich um ein in den Boden eingelassenes Fundament, an dem ein Schild befestigt ist.

Auf dem Asphalt und Beton wurden die Thermoelemente mit Wärmeleitpaste fixiert und durch Alufolie abgedeckt um die direkt von der Sonne einfallende Strahlung abzuschirmen (Abb. 3.11). Die Wärmeleitpaste sollte dafür sorgen, daß der Sensor jeweils die Temperatur des Materials und nicht die der Luft annimmt. Das Thermoelement auf der „Wiese", die nur recht spärliche Vegetation aufwies, wurde direkt auf den Boden gelegt. Zwei weitere Einheiten wurden auf dem Dach

Abbildung 3.11: Aufzeichnungeinheit am Nürnberger Flughafen

des Flughafengebäudes ausgelegt, eine davon sollte windgeschützt sein. Es stellte sich dann heraus, das dieses Thermoelement am Tag der Überfliegung bis 9 Uhr MEZ im Schatten des Gebäudes lag. Auf dem Kiesdach wurden die Sensoren zwischen die Kieselsteine gelegt.

Abbildung 3.12 zeigt die über 24 Stunden gemessenen Temperaturen einiger Materialien und den Sonnenstand, der sein Maximum beim Winkel $50,78°$ erreicht und bei $0°$ nach unten begrenzt wurde. Zum Zeitpunkt des Sonnenuntergangs (ca. 19 Uhr) ist ein deutliches Abknicken der Temperaturkurven zu erkennen. Die Erwärmung der Materialien setzt sehr früh nach dem Sonnenaufgang ein. Allerdings gelangt auch vor dem Erreichen des Sonnenstandes von $0°$ schon Sonnenlicht auf die Erdoberfläche, da die Atmosphäre aufgrund ihrer variablen Dichte die Lichtstrahlen krümmt.

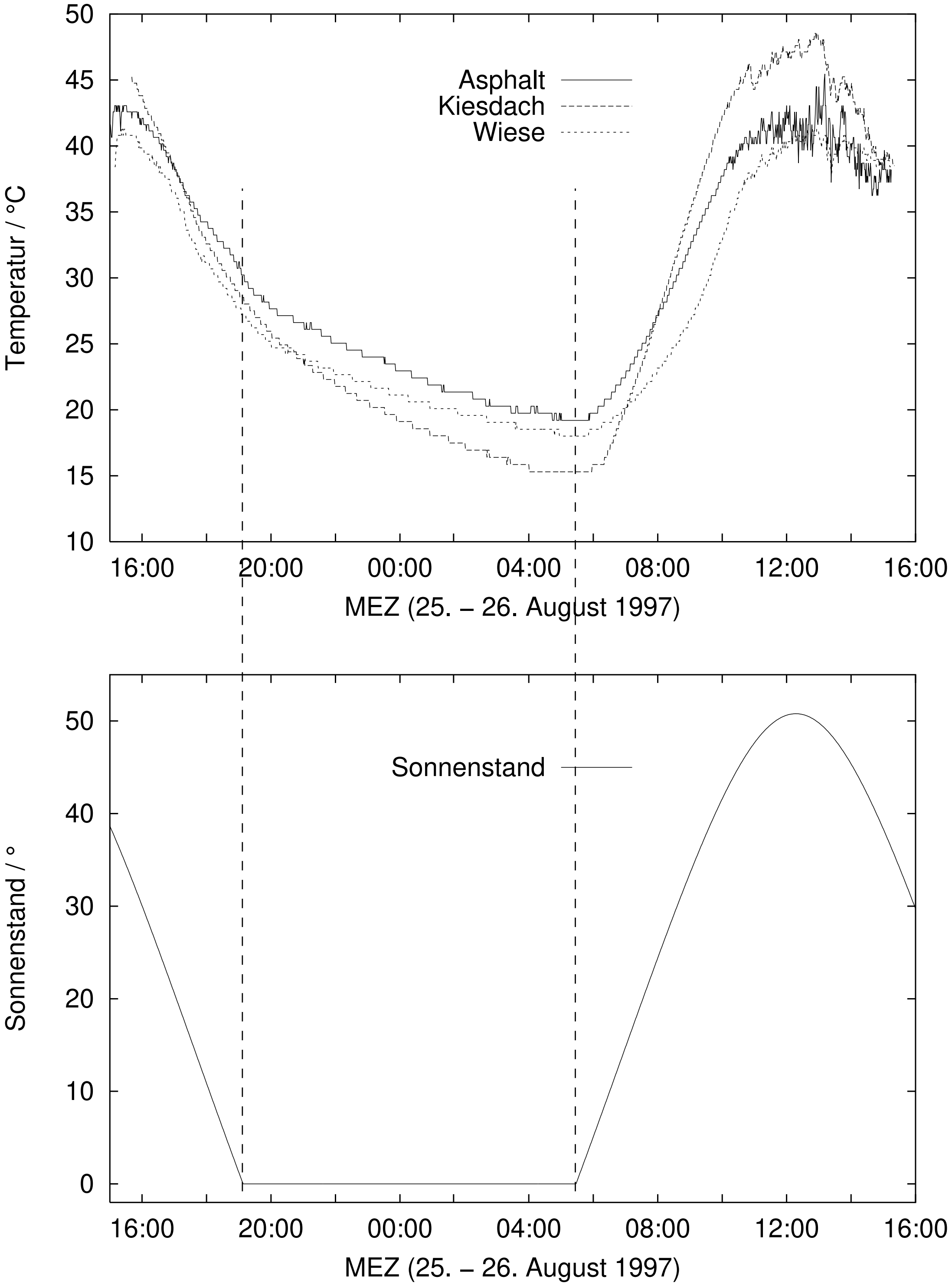


Abbildung 3.12: 24-Stunden-Temperaturmessung Nürnberg (25. - 26. August 1997): Temperaturen einiger Materialien und Sonnenstand. Sonnenaufgang und Sonnenuntergang sind durch senkrechte gestrichelte Linien markiert. Die Messung „Kiesdach“ stammt von dem Thermoelement, das *nicht* zeitweise verschattet war

4 Auswertung

In diesem Kapitel sollen die Schritte, die zur Auswertung der Daten nötig waren, beschrieben werden. Zunächst ist es notwendig, die aus der Luft gemessenen Temperaturen zu kalibrieren und auf den Einfluß der Atmosphäre zu korrigieren. Daran schließt sich ein Vergleich von aus der Luft und am Boden gemessenen Temperaturen an.

In weiteren Abschnitten wird die Klassifikation von Thermalbildern beschrieben und die Überprüfung der Klassifikationsgenauigkeit vorgenommen. Der letzte Abschnitt steht unter der Fragestellung, ob die Betriebszustände von künstlichen Objekten aus der Luft bestimmt werden können.

4.1 Berechnung der Temperaturbilder

Um aus den Rohdaten des Daedalus-Detektors Temperaturbilder zu erhalten, sind zwei Schritte nötig. Zunächst muß die einem Grauwert entsprechende Strahlungstemperatur ermittelt werden. Wie in Abschnitt 2.5 (S. 12) verdeutlicht wurde, ist es außerdem notwendig, die Daten des Multispektralscanners auf den Einfluß der Atmosphäre zu korrigieren. Zum Einsatz kommt dabei das Programmpaket SENSAT-5 [Ric92].

4.1.1 Interpolation zwischen Schwarzkörperstrahlern

Der Detektor Daedalus AADS 1268 besitzt zwei Schwarzkörperstrahler, deren Strahldichten als Zählraten für jede Bildzeile mit aufgezeichnet werden. Die Temperaturen der Strahler werden ebenfalls registriert, so daß es bei der Auswertung möglich ist, aus dem Grauwert eines Pixels durch Interpolation die Strahlungstemperatur zu bestimmen.

Meist wird zur Berechnung der Strahlungstemperatur T_i eines Pixels mit dem Grauwert D_i die folgende lineare Interpolation verwendet [Ric92]:

$$T_i = T_{\mathrm{BB1}} + \frac{T_{\mathrm{BB2}} - T_{\mathrm{BB1}}}{D_{\mathrm{BB2}} - D_{\mathrm{BB1}}}(D_i - D_{BB1}), \tag{4.1}$$

dabei sind:

T_{BB1}, T_{BB2}	die Temperaturwerte der beiden Scanner-internen Schwarzkörper,
D_{BB1}, D_{BB2}	die zugehörigen Grauwerte der Schwarzkörper-Abtastung,
D_i	die Szenen-Grauwerte.

Die lineare Interpolation eignet sich für eine geringe Temperaturdifferenz der beiden Schwarzkörperstrahler. Bei einer Differenz von 20 °C ist der durch die Interpolation entstehende Fehler kleiner als 0,5 °C [Lip95].

Bei der linearen Interpolation wird davon ausgegangen, daß die Abhängigkeit der vom Sensor gemessenen integralen Strahldichte von der Temperatur linear

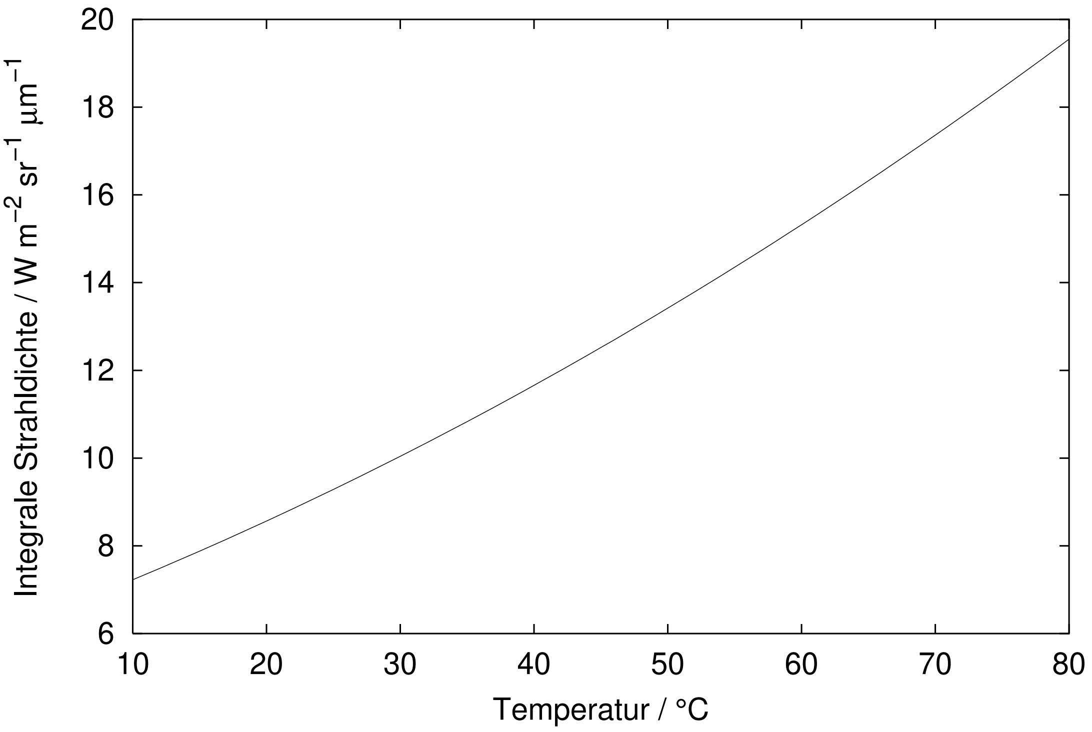


Abbildung 4.1: Relative integrale Strahldichte eines schwarzen Körpers als Funktion seiner Temperatur (gewichtet mit der Gesamtfilterfunktion des Daedalus)

ist. Dies gilt aber nur für kleine Temperaturbereiche. Abbildung 4.1 zeigt die nach Gleichung (2.8) berechnete integrale Strahldichte eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Temperatur. Bei der Integration wurde die in Abbildung 2.6 dargestellte Gesamtfilterfunktion verwendet. Die Plancksche Strahldichte des schwarzen Körpers wurde mit der Detektorfunktion multipliziert und numerisch im Bereich 8 – 15 μm integriert [PdDUK83]. Da die Filterfunktion des Detektors so skaliert ist, daß der Maximalwert auf 1 gesetzt wurde, ist die so erhaltene Strahldichte nur eine relative Strahldichte. Im folgenden ist diese Größe gemeint, wenn von einer integralen Strahldichte die Rede ist. Bei der Kalibration der vom Daedalus gemessenen Temperaturen wird mit Detektorgrauwerten gerechnet, so daß ein Faktor vor der Strahldichte keinen Einfluß hat.

Bei der Auswertung des Datenmaterials, das am 26. August 1997 aufgenommen wurde, stellte sich heraus, daß in einigen Bildern recht hohe Temperaturen auftraten (bis 80 °C). Die Schwarzkörperstrahler waren während der Überfliegung auf ca. 10 °C, bzw. 50 °C eingestellt. Im Hinblick auf diese Werte im Vergleich mit Abb. 4.1 erscheint es vorteilhafter, nicht mit linearer Interpolation zu rechnen, sondern die Strahldichtefunktion zu modellieren, um zu einer genaueren Kalibra-

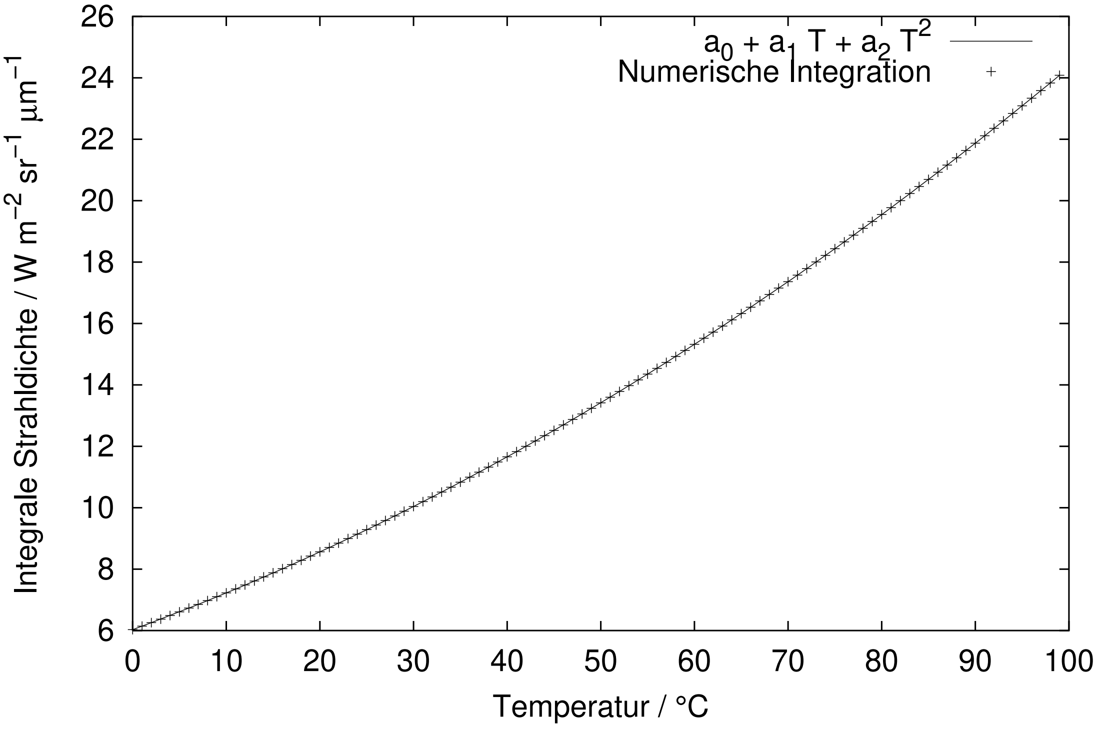


Abbildung 4.2: Fit an die relative integrale Strahldichte. Parameter: $a_0 = (6,0318 \pm 0,0003) \times 10^6\ \mathrm{Wm^{-3}sr^{-1}}$, $a_1 = (1,1242 \pm 0,0002) \times 10^5\ \mathrm{Wm^{-3}sr^{-1}K^{-1}}$, $a_2 = (7,065 \pm 0,002) \times 10^2\ \mathrm{Wm^{-3}sr^{-1}K^{-2}}$

tion zu kommen.

Modellierung der Strahldichtefunktion

Bei der Berechnung einer Tabelle, die den Zählraten des Detektors Temperaturwerte zuordnet, muß von Temperatur auf integrale Strahldichte umgerechnet werden und umgekehrt. Daher bietet es sich an, die Abhängigkeit durch ein Polynom anzunähern, dessen Umkehrfunktion einfach zu berechnen ist. Abbildung 4.2 zeigt die integrale Strahldichte in Abhängigkeit von der Temperatur, die durch numerische Integration berechnet wurde. Wiederum wurde mit der Filterfunktion des Detektors [Ama98] gewichtet. Daran angepaßt wurde ein Polynom zweiten Grades:

$$L_{\mathrm{int}}(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2. \tag{4.2}$$

Die Parameter der Funktion sind

$$\begin{aligned} a_0 &= (6{,}0318\ \pm 0{,}0003)\ \times 10^6\ \mathrm{Wm^{-3}sr^{-1}}, \\ a_1 &= (1{,}1242\ \pm 0{,}0002)\ \times 10^5\ \mathrm{Wm^{-3}sr^{-1}K^{-1}}, \\ a_2 &= (7{,}065\ \ \pm 0{,}002)\ \ \times 10^2\ \mathrm{Wm^{-3}sr^{-1}K^{-2}}. \end{aligned}$$

Die angegebenen Fehler sind die Standardabweichungen der Fitparameter. Für die Datenpunkte wurde kein Fehler veranschlagt, da es keine Angaben über die Unsicherheit der Detektorfunktion gibt.

Die kleinen Fehler zeigen, daß die Übereinstimmung der Funktion (4.2) mit der integralen Strahldichte sehr gut ist. Obwohl man einen Abhängigkeit von T^4 analog zum Stefan-Boltzmann-Gesetz erwarten würde (allerdings integriert über den gesamten Wellenlängenbereich), ist ein Polynom zweiten Grades im Bereich von 0 °C bis 100 °C eine sehr gute Näherung.

Berechnung der Umrechnungstabelle

Die Umkehrfunktion von (4.2) ist leicht zu berechnen:

$$T(L_{\mathrm{int}}) = -\frac{a_1}{2a_2} + \sqrt{\frac{a_1^2}{4a_2^2} - \frac{a_0}{a_2} + \frac{L_{\mathrm{int}}}{a_2}}. \tag{4.3}$$

Die Umrechnungstabelle, die jeder Zählrate eine Temperatur zuordnet, läßt sich damit folgendermaßen berechnen: Strahldichte und Zählrate sind zueinander proportional. Analog zu (4.1) läßt sich die Strahldichte einer beliebigen Zählrate D berechnen durch

$$L_{\mathrm{int}}(D) = L_{\mathrm{int}}(T_{\mathrm{BB1}}) + \frac{L_{\mathrm{int}}(T_{\mathrm{BB2}}) - L_{\mathrm{int}}(T_{\mathrm{BB1}})}{D_{\mathrm{BB2}} - D_{\mathrm{BB1}}}(D - D_{BB1}), \tag{4.4}$$

wobei $L_{\mathrm{int}}(T)$ sich aus dem Polynom (4.2) ergibt. Mit Gl. (4.3) kann dann die gesuchte Umrechnungstabelle $T(D)$ erzeugt werden:

$$\begin{aligned} T(D) \;=\; & -\frac{a_1}{2a_2} + \\ & \sqrt{\frac{a_1^2}{4a_2^2} - \frac{a_0}{a_2} + \frac{1}{a_2}\left[L_{\mathrm{int}}(T_{\mathrm{BB1}}) + \frac{L_{\mathrm{int}}(T_{\mathrm{BB2}}) - L_{\mathrm{int}}(T_{\mathrm{BB1}})}{D_{\mathrm{BB2}} - D_{\mathrm{BB1}}}(D - D_{BB1})\right]}. \end{aligned}$$

Abb. 4.3 zeigt ein Beispiel für eine so berechnete Umrechnungstabelle und die lineare Interpolation zum Vergleich. Die Stützpunkte (10 °, 12) und (50 °, 133) sind für die Überfliegung von 1997 typisch. Die lineare Interpolation weicht maximal 9,8 °C von der Umrechnungstabelle ab (bei der Zählrate 255). Dies zeigt, daß die lineare Interpolation besonders bei sehr hohen Temperaturen die Temperatur überschätzt. Zwischen den beiden Stützpunkten beträgt die maximale Abweichung 1,8 °C. In diesem Bereich wird die Temperatur durch die lineare Interpolation unterschätzt.

Gesamtfehler der Interpolation

Verschiedene Fehler müssen bei der Bestimmung des Gesamtfehlers der interpolierten Temperaturwerte berücksichtigt werden:

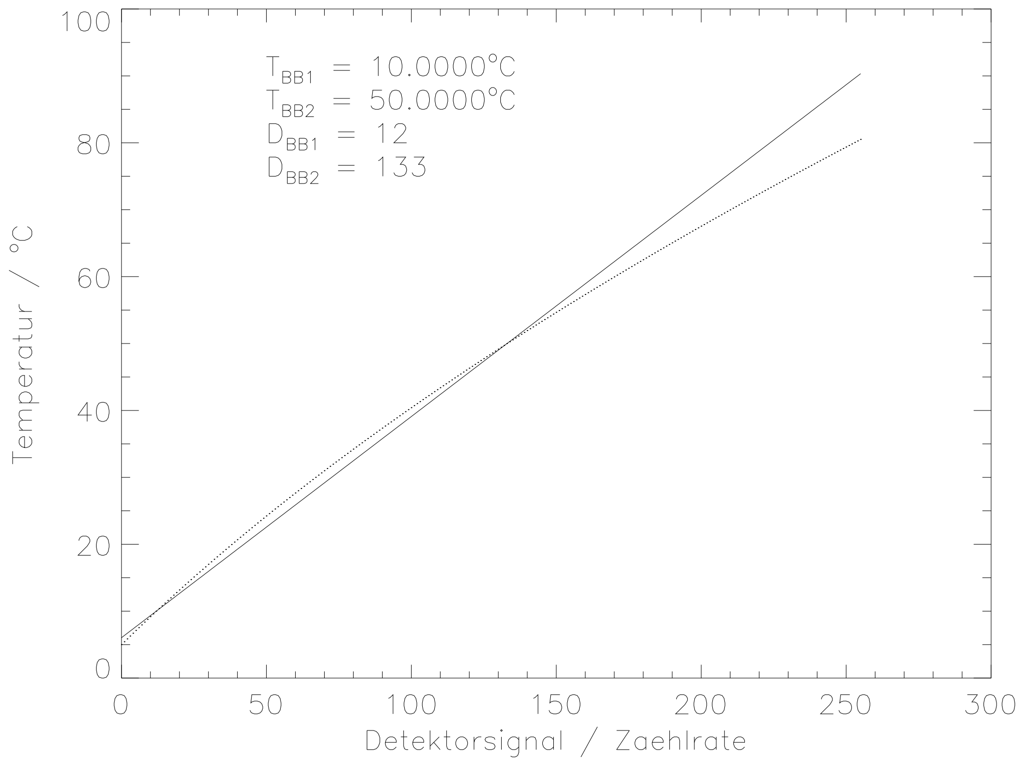


Abbildung 4.3: Umrechnungstabelle für die Konvertierung von Zählraten (Grauwerten) des Daedalus-Kanals 11 auf Temperaturen (Punkte). Die durchgezogene Linie stellt zum Vergleich die lineare Interpolation dar

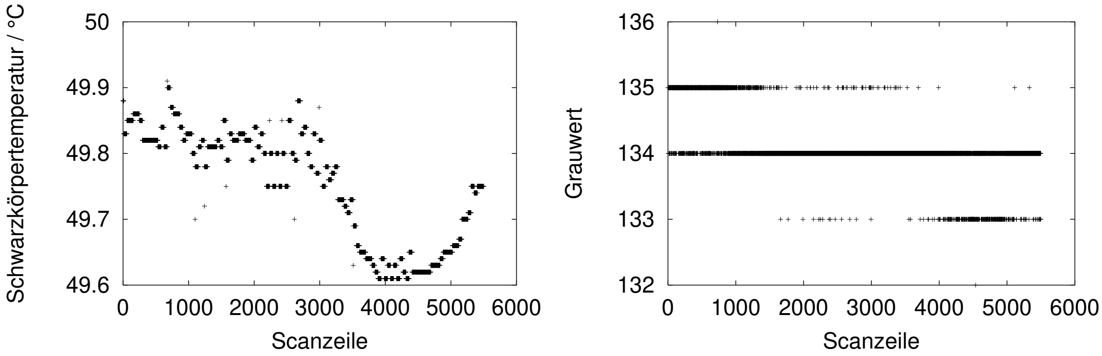


Abbildung 4.4: Temperatur und aufgezeichneter Grauwert eines internen Schwarzkörperstrahlers über einen Flugstreifen

1. Der Digitalisierungsfehler rührt von der begrenzten Auflösung (8 Bits) des A/D-Wandlers im Daedalus-Detektor. Die Unsicherheit ist in jedem Fall $\pm\frac{1}{2}$ Grauwert.

2. Jede elektronische Messung ist mit Rauschen verbunden. Der Fehler, der durch Rauschen entsteht, wurde abgeschätzt, indem die Standardabweichung der Grauwerte eines Schwarzkörperstrahlers über einen Flugstreifen (5500 Scanlinien) bestimmt wurde (s. Abb. 4.4 rechts). Die Standardabweichung beträgt 0,22.

3. Die Temperaturen der Schwarzkörperstrahler werden nur mit einer bestimmten Genauigkeit gemessen. Dieser Fehler wurde aufgrund der Sprünge im Signal (s. Abb. 4.4 links) auf 0,1 °C abgeschätzt. Die Aufzeichnung erfolgte mit 100 Hz, so daß 1000 Scanzeilen 10 Sekunden entsprechen.

Der Gesamtfehler muß mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet werden. In Anhang A (S. 85) ist die Ableitung dieses Gesamtfehlers beschrieben. Abb. 4.5 zeigt eine Darstellung des Gesamtfehlers von Gl. (A.1) für die typischen Parameter $T_{\mathrm{BB1}} = 10$ °C, $T_{\mathrm{BB2}} = 50$ °C, $D_{\mathrm{BB1}} = 12$ und $D_{\mathrm{BB2}} = 133$. Die eingegangen Fehler sind $\sigma_D = \sqrt{(1/2)^2 + 0{,}22^2} = 0{,}55$ (Digitalisierungsfehler und Fehler durch Rauschen quadratisch addiert) und $\sigma_{T_{\mathrm{BB}}} = 0{,}1$ °C.

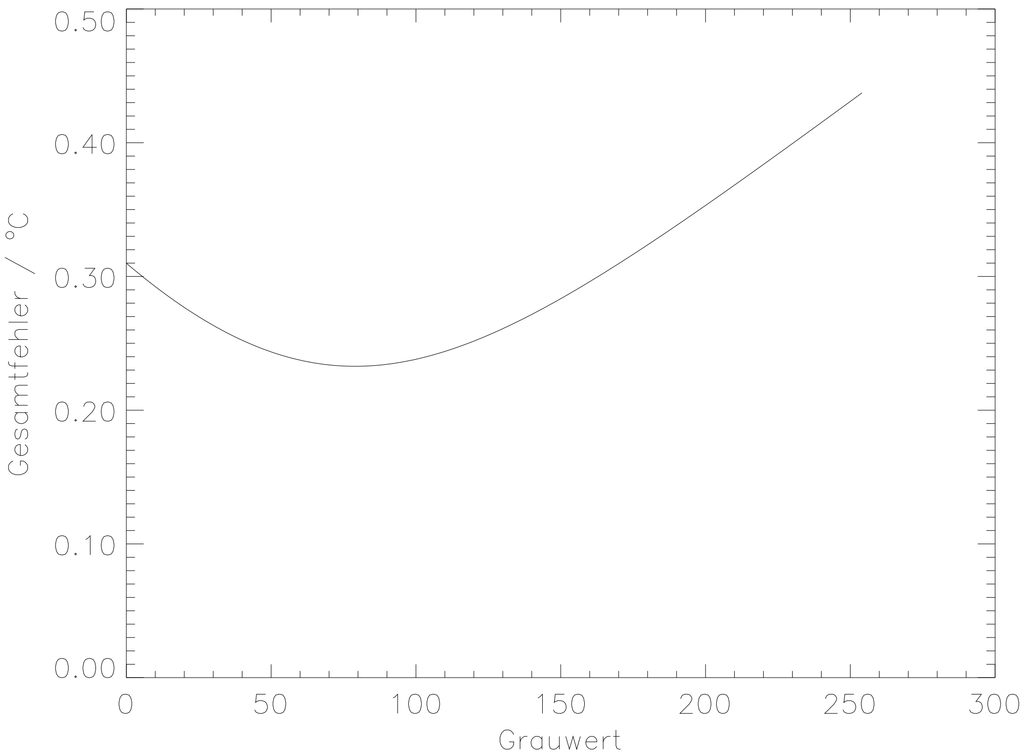


Abbildung 4.5: Gesamtfehler der aus den Daedalusdaten abgeleiteten Strahlungstemperatur in Abhängigkeit vom Detektorsignal nach Gl. (A.1). Schwarzkörpertemperaturen und zugehörige Grauwerte sind wie in Abb. 4.3

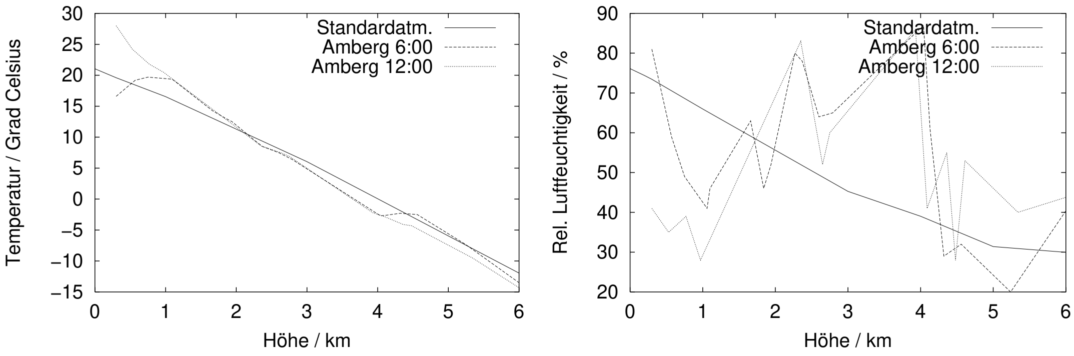


Abbildung 4.6: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte im Vergleich von SENSAT-Standardatmosphäre "mid-latitude summer" und Radiosondenaufstiegen in Amberg am 26. August 1997

4.1.2 Atmosphärenkorrektur mit SENSAT

Zur Korrektur der Temperaturen auf den Einfluß der Atmosphäre wurde das Programmpaket SENSAT-5 verwendet [Ric94]. Die wichtigsten Eingabeparameter sind:

1. Die Detektorfunktion,
2. Die Radiosondendaten (Höhenprofile von Luftdruck, Temperatur und relativer Luftfeuchte),
3. Flughöhe (über NN) und Höhe des Bodens,
4. Aerosoltyp (Ländlich, städtisch),
5. Sichtweite,
6. Emissivität der Zielfläche.

Als Detektorfunktion wurde die in Abb. 2.6 dargestellte Filterfunktion verwendet. Die Flughöhe war 600 m, bzw. 1200 m über NN, die Höhe von Nürnberg beträgt ca. 300 m. Als Aerosoltyp wurde „städtisch" angegeben. Dieser Aerosoltyp wurde standardisiert für Städte in den USA auf mittlerer Breite im Programmpaket MODTRAN gespeichert. Die horizontale Sichtweite betrug laut Angaben des Nürnberger Flughafens 20 km. Für die Emissivität wurde der Wert 0,95 verwendet.

Flughöhe	Atmosphäre	Scanwinkel	T_{BB} [°C] (T_{surf} = 10°C)	T_{BB} [°C] (T_{surf} = 60°C)
300 m	Standard	0,0°	9,9	54,5
	Amberg 6:00	0,0°	9,9	54,5
	Amberg 12:00	0,0°	9,9	55,6
	Standard	43,0°	9,9	53,5
	Amberg 6:00	43,0°	9,4	53,7
	Amberg 12:00	43,0°	9,8	54,6
900 m	Standard	0,0°	10,1	51,1
	Amberg 6:00	0,0°	9,9	52,1
	Amberg 12:00	0,0°	10,1	53,3
	Standard	43,0°	10,5	49,5
	Amberg 6:00	43,0°	10,3	50,8
	Amberg 12:00	43,0°	10,5	52,3

Tabelle 4.1: Vergleich der drei verwendeten Atmosphärenmodelle Standard (mid-latitude summer), Radiosondenaufstieg Amberg 6 Uhr, bzw. 12 Uhr

Radiosondendaten

Da am Tag der Überfliegung kein Radiosondenaufstieg in Nürnberg durchgeführt wurde, wurden Daten aus Amberg (ca. 55 km östlich von Nürnberg) zur Atmosphärenkorrektur verwendet [Fri97]. Abbildung 4.6 zeigt die Temperatur und die relative Luftfeuchte jeweils in Abhängigkeit von der Höhe über NN. Im Vergleich mit der Standardatmosphäre fällt auf, daß es morgens eine Inversionsschicht gibt (Temperatur am Boden geringer als in 1 km Höhe) und daß die relative Luftfeuchte teilweise erheblich von der Standardatmosphäre abweicht. In 2,5 und 4 km Höhe deutet die hohe Luftfeuchte auf beginnende Wolkenbildung hin, die nach ca. 11:30 MEZ in Nürnberg tatsächlich von uns beobachtet wurde.

Die Atmosphärenkorrektur wurde sowohl mit den Werten der Radiosondenaufstiege von Amberg als auch mit der Standardatmosphäre "mid-latitude summer" (Sommer in mittleren Breiten, s. [Ric92]) durchgeführt. Die Ergebnisse sind für zwei Temperaturen (10 °C und 60 °C) in Tabelle 4.1 zusammengestellt. Die Abweichungen sind besonders bei einer Flughöhe von 900 m recht groß. Der durch die Wahl der Atmosphärenparameter bedingte Fehler hängt von der Oberflächentemperatur und der Flughöhe ab. Er wird von uns als mindestens ±1 °C angenommen, da die gemessenen Temperaturwerte im Bereich 15 °C bis 45 °C liegen und die Atmosphärenverhältnisse in Nürnberg selbst nur unzureichend bekannt waren.

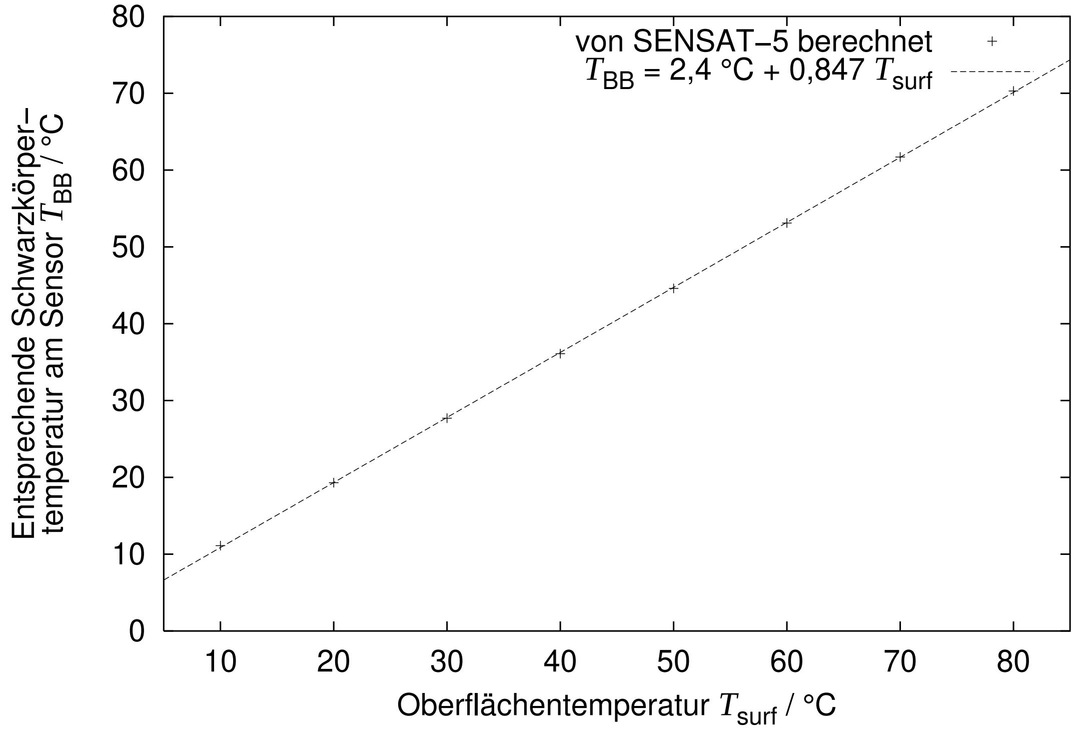


Abbildung 4.7: Ergebnis der Atmosphärenkorrektur mit SENSAT-5 mit Regressionsgeraden $T_{\mathrm{BB}} = (2{,}4 \pm 0{,}1)\ ^\circ\mathrm{C} + (0{,}847 \pm 0{,}002) \cdot T_{\mathrm{surf}}$. Flughöhe 900 m, Emissivität 0,95

Umrechnung der Strahlungstemperaturen

SENSAT liefert als Ausgabe eine Tabelle von Bodentemperaturen und zugehörigen Schwarzkörpertemperaturen am Sensor. Diese hängen vom Scanwinkel ab, da der Weg, den die Strahlung durch die Atmosphäre zurücklegen muß, mit zunehmendem Scanwinkel ansteigt.

Pro SENSAT-Prozessierung können zwei Temperaturen angegeben werden, die zwei Oberflächentemperaturen darstellen. Der von SENSAT berechnete Wert ist dann die Temperatur eines schwarzen Körpers, der direkt (ohne Einfluß der Atmosphäre) in den Sensor strahlt.

Abbildung 4.7 zeigt das Ergebnis von vier Prozessierungen mit SENSAT-5. Dargestellt ist die einer bestimmten Oberflächentemperatur entsprechende Schwarzkörpertemperatur am Sensor im Nadir. Berechnet man die Regressionsgerade [PTVF92], so zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit der Funktion $T_{\mathrm{BB}} = a + b \cdot T_{\mathrm{surf}}$ mit den Parametern

$$\begin{aligned} a &= (2{,}4 \quad \pm 0{,}1)^\circ\mathrm{C} \\ b &= 0{,}847 \ \pm 0{,}002 \end{aligned}$$

Eine lineare Interpolation der Schwarzkörpertemperaturen ist hier also aufgrund der kleinen Fehler gerechtfertigt.

Aerosoltyp und Sichtweite

Um den Einfluß von Aerosoltyp und Sichtweite auf die Atmosphärenkorrektur abzuschätzen, wurden der Aerosoltyp und die Sichtweite variiert für eine Flughöhe von 900 m, da hier der Weg durch die Atmosphäre am größten ist. Wie die folgende Tabelle zeigt, hat der Aerosoltyp keinen Einfluß auf die Atmosphärenkorrektur der Temperaturen:

Aerosoltyp	Scanwinkel	T_{BB} [°C] ($T_{surf} = 10$°C)	T_{BB} [°C] ($T_{surf} = 50$°C)
Ländlich (1)	0,0°	11,1	44,6
Städtisch (5)		11,1	44,6
Ländlich (1)	43,0°	11,5	43,9
Städtisch (5)		11,5	43,9

Die Sichtweite wird vom Flughafen Nürnberg nach Augenmaß bestimmt, indem die Sichtbarkeit bestimmter Landmarken geprüft wird. Die Landmarken sind etwa 5 km voneinander entfernt, so daß die angegebene Sichtweite von 20 km auf etwa ±5 km genau ist. Der Einfluß der Sichtweite ist sehr gering, wie die folgende Tabelle zeigt:

Sichtweite	Scanwinkel	T_{BB} [°C] ($T_{surf} = 10$°C)	T_{BB} [°C] ($T_{surf} = 50$°C)
15	0,0°	11,2	44,5
20		11,1	44,6
25		11,0	44,6
15	43,0°	11,6	43,7
20		11,5	43,9
25		11,4	44,0

Insgesamt hat sich gezeigt, daß die Wahl der Atmosphäre (Standard, bzw. Sondenaufstiege) für die Atmosphärenkorrektur des Thermalkanals entscheidend ist. Aerosoltyp und Sichtweite haben einen geringen, bzw. keinen Einfluß. Die Absorption der thermischen Infrarotstrahlung wird wesentlich durch den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre bestimmt. Daher schlägt sich besonders die Luftfeuchte (S. Abb. 4.6) in der Korrektur nieder.

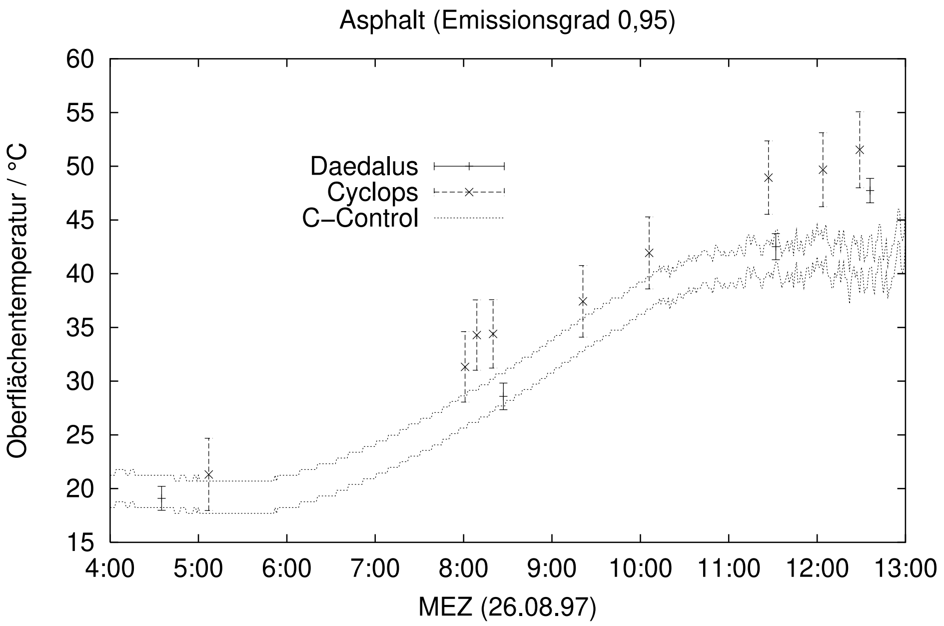


Abbildung 4.8: Die Temperatur einer Asphaltfläche am Nürnberger Flughafen. Cyclops: vom Strahlungstemperaturmeßgerät am Boden gemessene Temperaturen. Daedalus: vom Scanner aus 300 und 900 m Höhe gemessene Temperaturen. C-Control: vom Thermoelement gemessene Temperaturen. Dargestellt sind die obere und untere Fehlergrenze

4.2 Vergleich von Strahlungs- und kinetischer Temperatur

In den Abbildungen 4.8 bis 4.12 sind die am Tag der Überfliegung gemessenen Temperaturen verschiedener Oberflächen gegen die Zeit aufgetragen. Zur Bestimmung der Scanner-Temperaturen wurden auf den Scanner-Bildern Polygone auf den jeweils interessierenden Flächen definiert und die Temperatur über die im jeweiligen Polygon liegenden Pixel gemittelt. Die Fehlerbalken an den vom Daedalus gemessenen Temperaturen sind die quadratische Summe aus der Standardabweichung der Pixel, die zur Mittelung benutzt wurden, sowie aus den Unsicherheiten von 1 °C der Atmosphärenkorrektur und von 0,4 °C der Interpolation (geschätzt nach Abb. 4.5).

Das Strahlungstemperaturmeßgerät (Minolta/Land Cyclops Compac 3) hat einen Fehler von $\pm 1\%$ (bezogen auf den absoluten Nullpunkt), d. h. bei 20° C ergibt sich eine Unsicherheit von etwa ± 3 °C.

Für die Temperaturmessungen mit den Thermoelementen wurde der Fehler aufgrund der Angaben über die verwendete Elektronik (Sensor, Vorverstärker,

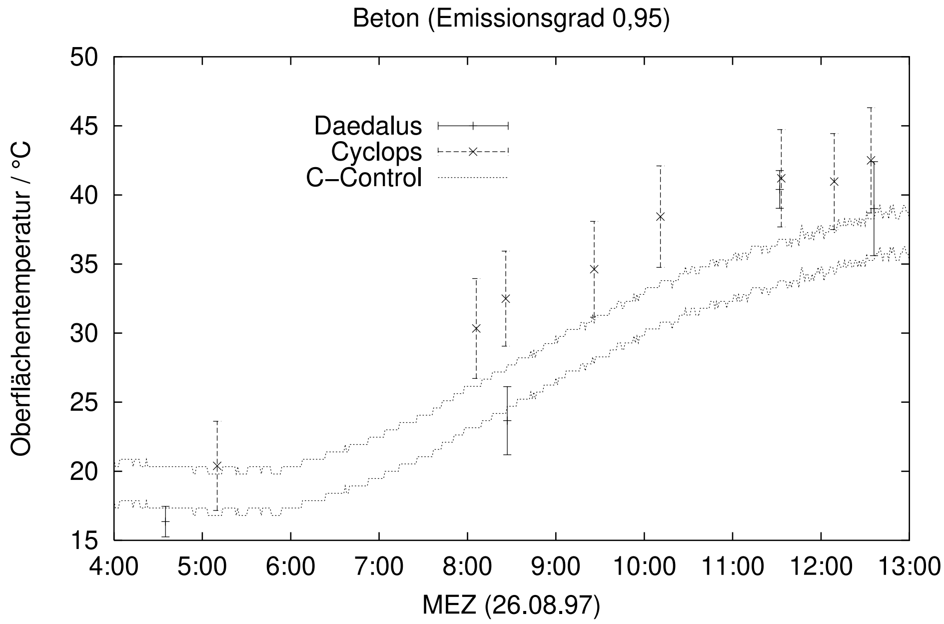


Abbildung 4.9: Die Temperatur einer Betonfläche am Nürnberger Flughafen. Bezeichnungen: s. Abb. 4.8

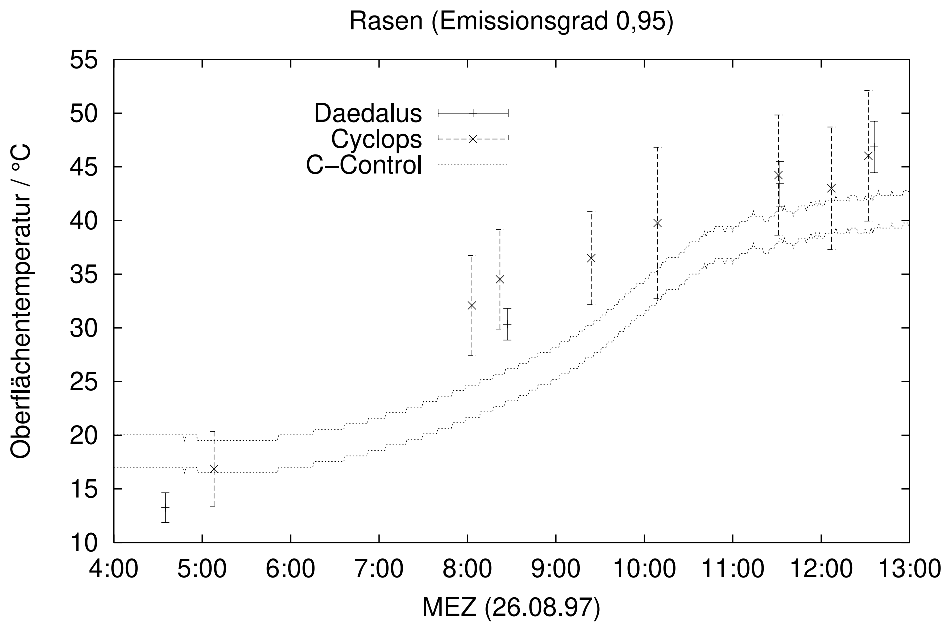


Abbildung 4.10: Die Temperatur einer Wiese am Nürnberger Flughafen. Bezeichnungen: s. Abb. 4.8

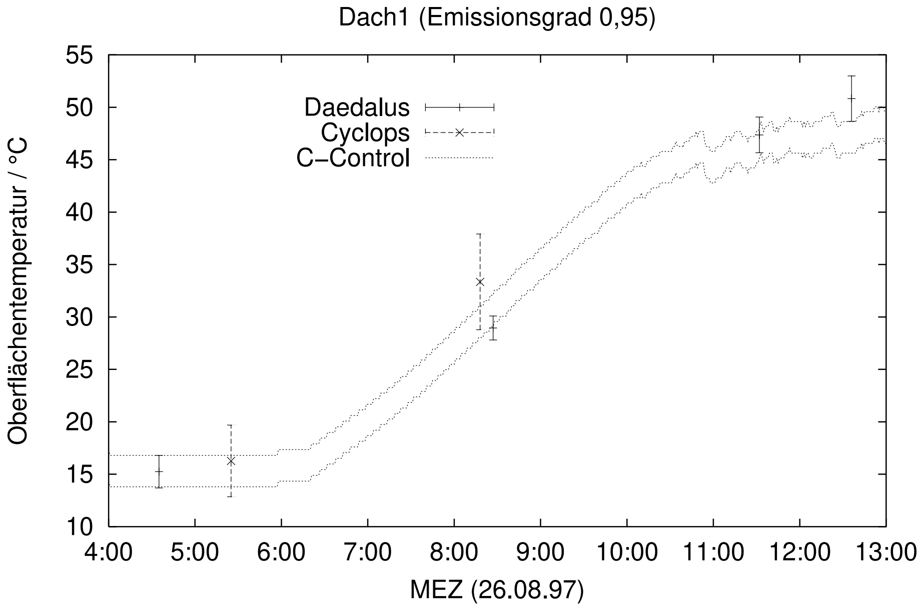


Abbildung 4.11: Die Temperatur eines Kiesdaches am Nürnberger Flughafen. Bezeichnungen: s. Abb. 4.8

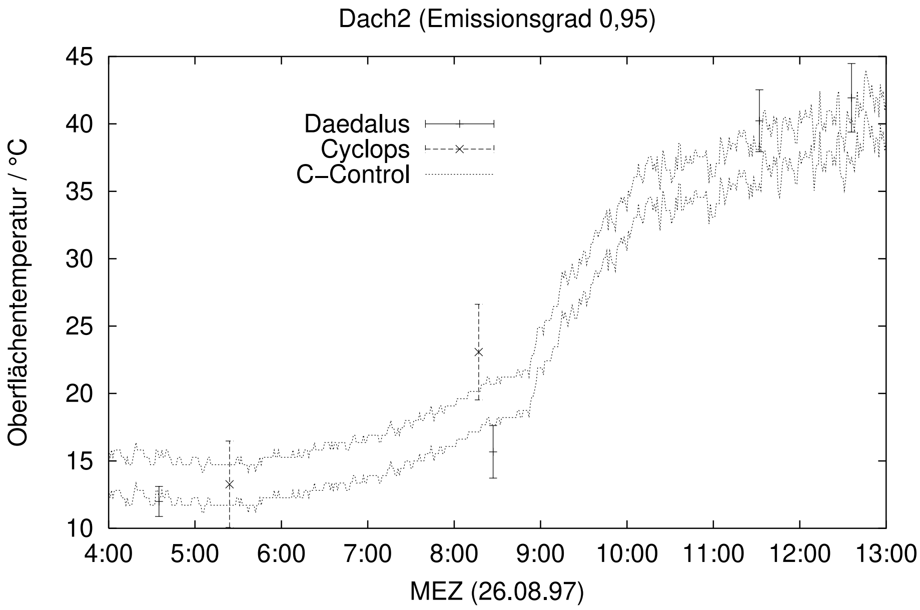


Abbildung 4.12: Die Temperatur eines Kiesdaches am Nürnberger Flughafen. Das Thermoelement befand sich bis um 9:00 Uhr im Schatten. Bezeichnungen: s. Abb. 4.8

A/D-Wandler) auf ±1,5 °C geschätzt (Abschnitt 3.2.1, S. 29).

Im Rahmen der Fehler ist die Übereinstimmung von mit Thermoelementen gemessenen Temperaturen und korrigierten Strahlungstemperaturen akzeptabel. Ursachen für Abweichungen sind:

- Die gemessenen Flächen sind nicht vollkommen homogen bezüglich der Temperaturverteilung. Das Thermoelement mißt an einem festen Punkt, während die vom Scanner gemessene Temperatur über ca. 10 m^2 gemittelt wird.

- Ab 12:00 Uhr treten starke Schwankungen in den Signalen der Thermoelemente auf. Dies könnte mit beginnender Wolkenbildung erklärt werden. Auf einigen der letzten Luftbildaufnahmen sind manche Gebiete schon deutlich durch Wolken verschattet.

- Die Lufttemperatur lag mit 27 °C (um 12:00 Uhr) deutlich unter der Oberflächentemperatur des Asphalts, so daß das Thermoelement, das mit Wärmeleitpaste auf dem Asphalt aufgebracht war, durch die bewegte Luft eventuell stärker abgekühlt wurde als der Asphalt selbst.

Insgesamt liegt die Unsicherheit der mit dem Luftbildscanner bestimmten Strahlungstemperaturen infolge der verschiedenen Störeinflüsse bei 2 – 3 °C.

Größere Abweichungen von Strahlungstemperaturen und der Meßkurve des Thermoelements gibt es bei der Wiesenfläche (Abb. 4.10). Während die Werte des Daedalus und des handgehaltenen Meßgerätes recht gut übereinstimmen, weicht die Kurve des Thermoelements davon ab. Der Grund hierfür mag die mangelnde Homogenität der Wiese sein, wie der folgende Abschnitt zeigt.

Homogenität der untersuchten Gebiete

Die Schwankungen der Temperatur in dem untersuchten Gebiet sind recht groß, wenn man sich ein Profil der vom Scanner gemessenen Temperatur ansieht. In Abb. 4.13 finden sich Temperaturprofile von drei Oberflächen: Wiese (#1), Asphalt (#2) und Kiesdach (#3). Auf den Farbinfrarot-Bildern ist erkennbar, daß die Wiese sehr unregelmäßige Vegetation enthält und sich bewachsene Stellen mit nackter Erde abwechseln. Daher sind hier besonders große Temperaturschwankungen von etwa 12 °C zu beobachten. Die Oberflächentemperatur des Asphalts ist im Gegensatz dazu recht stabil. Die Schwankungen der Oberflächentemperatur des Kiesdaches können auf lokal unterschiedliche Windverhältnisse zurückzuführen sein. Der zu beobachtende Temperaturabfall liegt in einer Zone, die durch die fehlenden Dachaufbauten besser belüftet sein könnte.

Die Vergleichbarkeit von lokal gemessenen Temperaturen und Scannertemperaturen in städtischen Gebieten wird durch die beobachteten Inhomogenitäten in Frage gestellt. Für eine eventuelle Kalibration der Scannerdaten aufgrund von

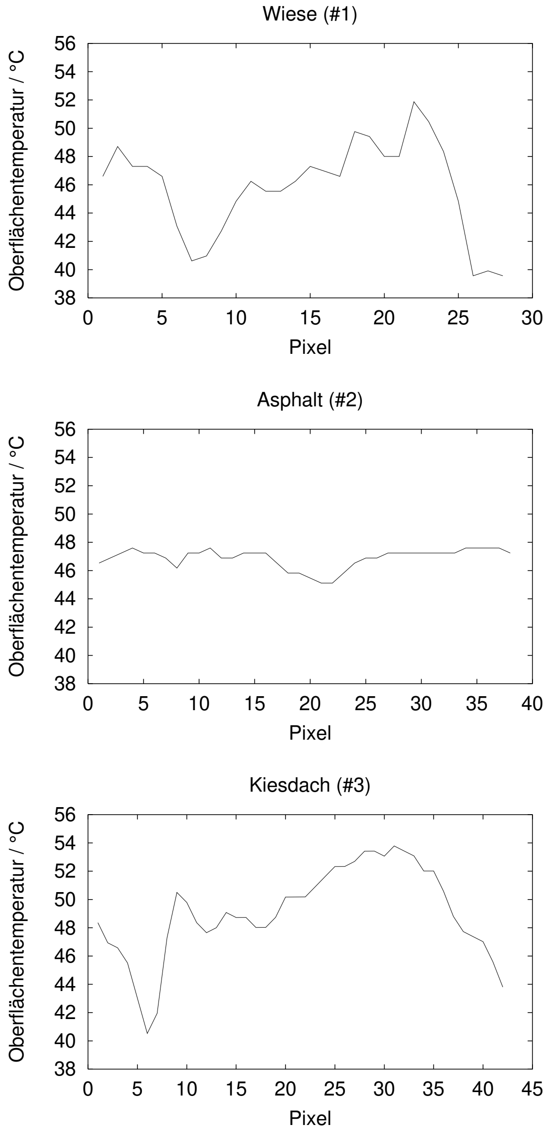


Abbildung 4.13: Oben: Temperaturbild (12:36 MEZ) von Vorfeld und Empfangsgebäude des Flughafens Nürnberg. Rechts: Temperaturprofile der Materialien Wiese (#1), Asphalt (#2) und Kiesdach (#3)

am Boden gemessenen Temperaturen sind auf jeden Fall sehr homogene Flächen notwendig. Eine andere Möglichkeit wäre die Verwendung von mehreren Thermoelementen pro Fläche, was natürlich einen erheblichen Aufwand erfordert.

4.3 Thermische Trägheit

Das in Abschnitt 2.4 beschriebene Modell kann auf die gemessenen Tagestemperaturgänge angewandt werden. Damit ist es möglich, die thermische Trägheit der verschiedenen Oberflächen zu bestimmen. Zunächst soll kurz auf die Bestimmung des Albedo eingegangen werden.

4.3.1 Berechnung des Albedo

Der spektrale Reflexionsgrad einer Oberfläche ist das Verhältnis von dem von der Oberfläche rückgestreuten Strahlungsfluß Φ_r zu dem einfallenden Strahlungsfluß Φ_e:

$$\rho = \frac{\Phi_\mathrm{r}}{\Phi_\mathrm{e}}$$

Im allgemeinen ist der Reflexionsgrad wellenlängenabhängig. In der Literatur [KS88, Man94] wird der Albedo A als Synonym für den Reflexionsgrad, gemittelt über alle Wellenlängen, eingeführt.

Die Reflektanzkanäle des Daedalus können dazu verwendet werden, den Albedo von Oberflächen zu bestimmen. Im Rahmen der Atmosphärenkorrektur der Kanäle 1 bis 10 wird der gemessene Strahlungsfluß durch den einfallenden Strahlungsfluß geteilt, so daß sich Reflektanzen ergeben, die auf die Graustufen 0 ($A = 0$) bis 255 ($A = 1$) abgebildet werden.

Um einen Albedo zu erhalten, der sinnvoll in Bezug auf die auftreffende Strahlungsleistung ist, muß ein Mittelwert über die Reflektanzen der Kanäle des Detektors gefunden werden. Hierbei ist es notwendig, die einzelnen Beiträge nach dem Sonnenspektrum zu gewichten. Andernfalls würden die Kanäle, bei denen die einfallende Strahlung gering ist, überbewertet.

Das Verfahren zur Bestimmung des Albedo benutzt das Spektrum der einfallenden Sonnenstrahlung, das mit MODTRAN berechnet wird. Der Einfluß der Atmosphäre wird also berücksichtigt. Die einzelnen Kanal-Grauwerte eines Pixels werden gewichtet nach dem jeweiligen Anteil des Kanals an der Gesamtfläche des Sonnenspektrums.

Die mit diesem Verfahren bestimmten Albedos der untersuchten Oberflächen sind

Material	Albedo
Asphalt	0,15 ± 0,01
Beton	0,36 ± 0,02
Wiese	0,22 ± 0,01
Kiesdach	0,17 ± 0,01

Die Standardabweichungen ergeben sich jeweils aus der Mittelung über einige Pixel.

4.3.2 Anpassung der Oberflächentemperaturen

Gleichung 2.7 beschreibt die Abhängigkeit der Oberflächentemperatur von der Zeit und einigen Parametern. Die folgenden Parameter können vor der Anpassung bestimmt werden:

1. Die Deklination δ der Sonne ist der Winkel zwischen der Rotationsachse der Erde und der Normalen auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne. Diese

Material	Thermische Trägheit [J m^{-2} $s^{-1/2}$ K^{-1}]
Asphalt	2113 ± 18
Beton	2228 ± 24
Wiese	2091 ± 18
Kiesdach	1242 ± 9

Tabelle 4.2: Durch Anpassung bestimmte Werte für die thermische Trägheit

Größe kann Tabellen entnommen werden[1], für den 26. August beträgt sie $\delta = 10{,}3°$.

2. Der Breitengrad von Nürnberg beträgt $\alpha = 49{,}5°$.

3. Die Solarkonstante S_0 gibt die über den gesamten Wellenlängenbereich integrierte auf die Erde auftreffende Strahlung an und beträgt ungefähr 1375 $\mathrm{W\,m^{-2}}$.

4. Als Schätzung für die Transmissivität der Atmosphäre wurde $\tau_{\mathrm{atm}} = 0{,}577$ angenommen. Dieser Wert entstammt einem Transmissionsspektrum, das mit MODTRAN berechnet wurde. Dieses wurde über den gesamten Wellenlängenbereich integriert.

Die Linearisierungsparameter A_c und B, sowie die hier interessierende thermische Trägheit P werden durch die Anpassung der Meßkurve an das Modell bestimmt.

In den Abbildungen 4.14 bis 4.17 sind die von den Thermoelementen gemessenen Tagestemperaturgänge und die jeweils beste Anpassung des Modells dargestellt. Es wurde eine nichtlineare Anpassung verwendet (*non-linear least square*). Auf die Darstellung der Meßkurve des fünften Aufzeichnungsgerätes wurde verzichtet, da das Thermoelement am Vormittag teilweise verschattet war. Von allen Meßkurven wurden die Temperaturen der letzten zwei Stunden entfernt, weil die aufkommenden Wolken die Temperatur stark schwanken ließen. Dies kann vom Modell aber nicht berücksichtigt werden.

Die damit erhaltenen thermischen Trägheiten stehen in Tabelle 4.2. Die Bestimmung des Fehlers der thermischen Trägheit ist im Anhang B beschrieben. Trotz des Fehlers der Temperaturaufzeichnungsgeräte von $\pm 1{,}5$ °C ist der Fehler der thermischen Trägheit recht klein. Dies liegt an der großen Zahl der Meßwerte (ein Wert pro Minute über 24 Stunden $\widehat{=}$ 1440 Meßwerte).

4.3.3 Diskussion

Zunächst muß bedacht werden, daß die im Modell geforderte Voraussetzung des homogenen Halbraums für keine Probe gegeben ist. Da aber die Temperatur in

[1] Eine Tabelle findet sich z. B. unter `http://www.amtsgym-sdbg.dk/as/rw/almanac.htm`

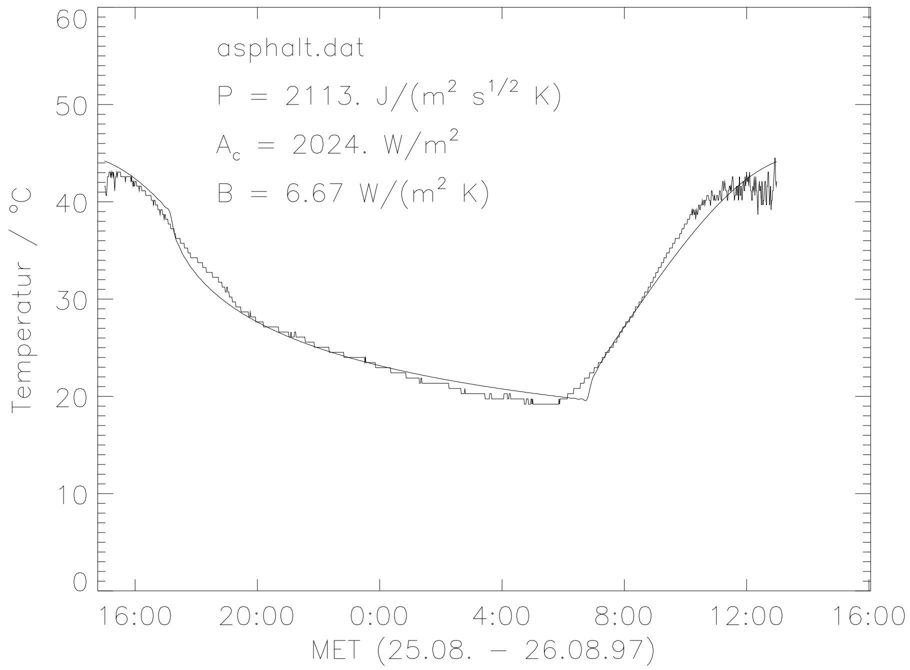


Abbildung 4.14: Tagestemperaturgang einer Asphaltfläche am Nürnberger Flughafen und beste Anpassung des Modells (2.7)

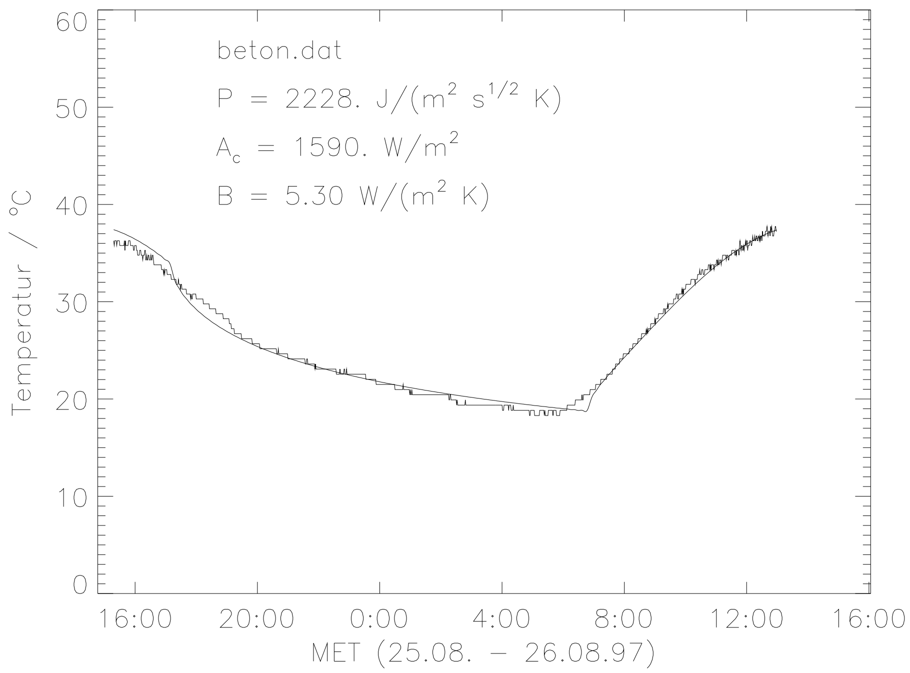


Abbildung 4.15: Tagestemperaturgang einer Betonfläche am Nürnberger Flughafen und beste Anpassung des Modells (2.7)

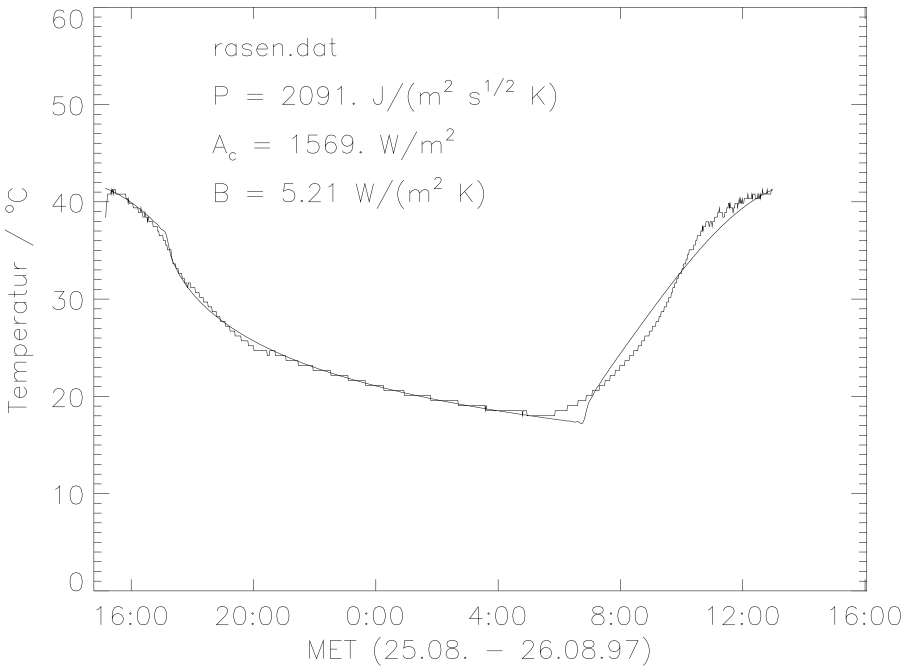


Abbildung 4.16: Tagestemperaturgang einer Rasenfläche am Nürnberger Flughafen und beste Anpassung des Modells (2.7)

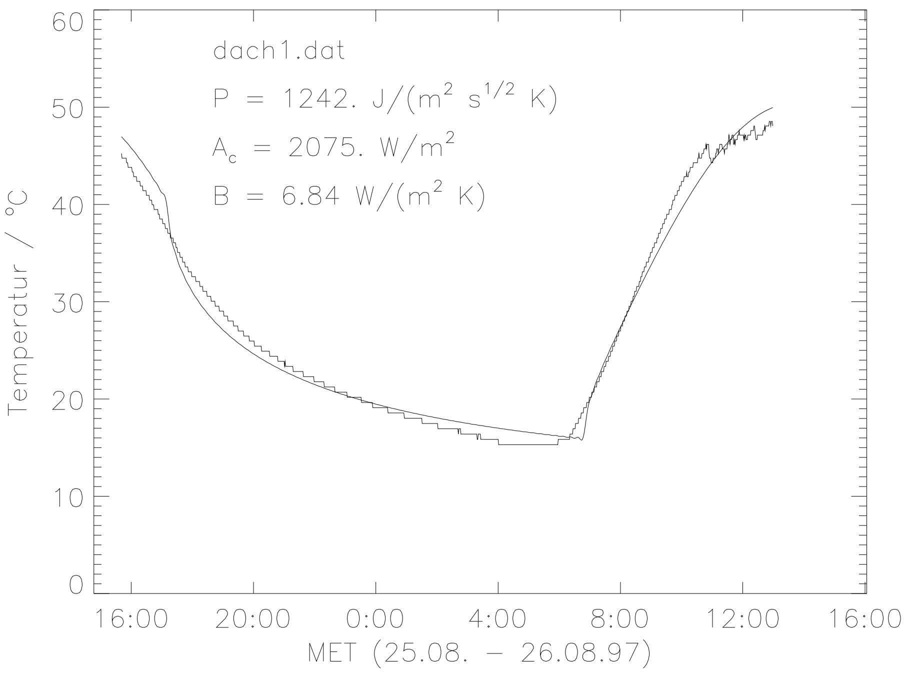


Abbildung 4.17: Tagestemperaturgang einer Kiesdachfläche am Nürnberger Flughafen und beste Anpassung des Modells (2.7)

Material	Thermische Trägheit in J m^{-2} K^{-1} $s^{-1/2}$ [Man94]	[Ela87]	[Ree90]	Diese Arbeit
Gestein	1700–3200	1424	—	(Asphalt) 2110±20
Granit	—	2177	—	
Sand (trocken)	585	—	700	
Lehm (trocken)	540	—	—	
Sand (feucht)	2510	—	—	
Lehm (feucht)	2170	1758	1800	(„Wiese“) 2090±20
Sandiger Boden	—	1005	1000	
Kies	—	1340	—	1240±10
Beton	—	—	900	2230±20

Tabelle 4.3: Thermische Trägheiten einiger Materialien aus verschiedenen Quellen. Zum Vergleich sind die Ergebnisse dieser Arbeit nochmals aufgeführt

recht geringer Tiefe bereits konstant ist (vgl. Abb. 2.3), bzw. die thermischen Eigenschaften der darunterliegenden Materialien ähnlich sind, sollte dies keine so große Rolle spielen.

Es ist schwierig, in der Literatur Vergleichswerte für die thermische Trägheit zu finden. Die meisten Materialien sind überwiegend für geologische Anwendungen von Interesse. In Tabelle 4.3 sind einige Trägheiten aus verschiedenen Quellen zusammengestellt. Ähnlich wie bei der Emissivität schwanken die Angaben teilweise stark. Es fällt außerdem auf, daß der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens einen großen Einfluß auf die Trägheit hat.

Die im Rahmen dieser Arbeit bestimmten Werte widersprechen den Literaturwerten nur im Falle des Betons (Literatur: 900, Anpassung: 2230±20 J m^{-2} K^{-1} $s^{-1/2}$). Der Grund hierfür mag sein, daß das untersuchte Betonfundament nur ein Volumen von etwa 1 m^3 hatte. Es muß also davon ausgegangen werden, daß die umgebende Erde einen erheblichen Anteil an der hohen beobachteten thermischen Trägheit hat. Der Wert des Asphalts ist mit dem Bereich von Gestein vereinbar. Die „Wiese“, deren Vegetationsdecke teilweise sehr spärlich war, wird wohl am besten mit feuchtem Boden (Lehm/Sand) beschrieben.

Wie zu erwarten ist die Trägheit des Daches am geringsten. Hier ist die Voraussetzung eines homogenen Halbraumes am wenigsten erfüllt, da sich unter dem Dach eine isolierende Luftschicht befindet, die die Wärme nicht gut weiterleiten kann. Demzufolge ist die Aufheizung des Daches am höchsten.

4.4 Klassifikation von multitemporalen Thermalbildern

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Frage, ob sich Temperaturbilder von städtischen Gebieten zur Klassifikation eignen. Aus der Überfliegung von 1997 liegen Daten vor, die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen wurden. Daher liegt es nahe, die Temperaturbilder aufeinander zu registrieren. Ähnlich den Reflektanzen der verschiedenen Kanäle bilden die Temperaturdaten eines Bildpunktes zu verschiedenen Zeiten einen mehrdimensionalen Merkmalsraum. Die Information, anhand derer die Objekte auf dem Boden voneinander unterschieden werden können, ist die thermische Trägheit.

In der Literatur finden sich noch recht wenige Beispiele für den Gebrauch von multitemporalen Thermaldaten zur Landnutzungs-Klassifikation. Ein Grund hierfür können die relativ hohen Kosten sein, die durch mehrfache Überfliegungen verursacht werden. In einer Studie zur Versiegelungserhebung des Instituts für Ökologische Raumentwicklung in Dresden [NM97] wurde mit einem bitemporalen Scannerdatensatz des Daedalus gearbeitet. In dieser Studie wurden die Spektralkanäle einer Mittagsbefliegung dazu verwendet, einen Vegetationsindex zu berechnen. Unbebaute versiegelte Flächen wurden durch ihre erhöhte Temperatur am Morgen separiert. Eine ähnliche Herangehensweise bietet sich für den Datensatz dieser Arbeit an.

4.4.1 Wissensbasierte Klassifikation

Für die Bestimmung des Versiegelungsgrades von städtischen Gebieten wird meistens der Vegetationsindex NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) benutzt, der definiert ist durch

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{R}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{R}} \qquad \in [-1, +1],$$

wobei NIR die Reflektanz im nahen Infrarot (0,76 bis 0,90 μm) und R die Reflektanz im roten Kanal (0,63 bis 0,69 μm) angibt. Es lassen sich aber auch Temperaturdaten für eine Klassifikation von versiegelten Flächen verwenden (s. [NM97]). Bei der Klassifikation mit Temperaturen läßt sich vor allem das unterschiedliche Aufheizungsvermögen der verschiedenen Materialien ausnutzen. Hier gibt es folgende charakteristische Merkmale:

Vegetation hat die Fähigkeit, sich durch Evapotranspiration zu kühlen, so daß die Temperatur zum Mittag nicht so stark ansteigt. Bei spärlicher Vegetationsbedeckung wird allerdings fast die Aufheizung von versiegelten Flächen erreicht, so daß der NDVI hier die bessere Entscheidungsgrundlage ist.

Versiegelte Flächen wie Straßen und Parkplätze zeichnen sich durch extreme Aufheizung und hohe thermische Trägheit aus, so daß auch in den Morgenstunden relativ hohe Temperaturen meßbar sind.

Dächer zeigen den größten Temperaturunterschied zwischen 6 und 12 Uhr. Morgens ist die Abkühlung aufgrund der geringen Trägheit weit fortgeschritten, am Mittag werden dann sehr hohe Temperaturwerte erreicht. Dies liegt vor allem an der isolierenden Luftschicht unter den Dächern.

Wasser hat eine sehr hohe thermische Trägheit. Daraus folgt, daß Wasserflächen in den Morgenaufnahmen als wärmste Flächen zu erkennen sind, während sie mittags zu den kältesten Flächen gehören.

In Abb. 4.18 ist ein Histogramm einer Szene (Gewerbegebiet, s. Abb. 4.19) im Temperatur-Merkmalsraum dargestellt. Dazu wurde der Merkmalsraum, gebildet aus der Temperatur um 4:36 und um 12:22, in Bins der Größe (1 °C) $\times$ (1 °C) eingeteilt. Die Häufigkeiten der Bildpunkte in den Bins wurden durch Höhenlinien sichtbar gemacht. Diese zeigen deutlich einige Maxima an, die auf verschiedene Oberflächen hindeuten.

Im folgenden wurden zur Klassifikation jeweils drei Datensätze verwendet, die Flächenverteilung der Temperatur um 4:36 MEZ (T_{mo}), die Flächenverteilung der Temperatur um 12:22 MEZ (T_{mi}) und die Verteilung des NDVI, der aus den mittags gemessenen Reflektanzen berechnet wurde. Dazu mußten die Temperaturbilder der morgendlichen Überfliegung (900 m) auf die Reflektanzbilder (300 m) registriert werden, wobei es durch die geringere Auflösung der ersteren zu Ungenauigkeiten kommt. Dies äußert sich im Ergebnis z. B. an Rändern von unklassifizierten Pixeln um Wasserflächen und Gebäude. Es wurde ein paßpunktgestütztes Registrierungsverfahren (nach Akima) verwendet, das in [Wie96] beschrieben wird. Die Emissivität wurde jeweils für die gesamte Szene auf $\epsilon = 0{,}95$ festgesetzt.

Die Einteilung in die Klassen wurden entsprechend Abbildung 4.18 in folgender Reihenfolge vorgenommen:

Wasser	$T_{\mathrm{mo}} > 20°$ und $T_{\mathrm{mi}} < 27°$
Vegetation	NDVI $> 0{,}4$
Versiegelter Boden	$T_{\mathrm{mo}} > 18°$
Metall	$T_{\mathrm{mi}} < 20°$
Unversiegelter Boden	$T_{\mathrm{mo}} > 13{,}5°$
Dächer	alle übrigen Pixel

Pixel, die einmal klassifiziert wurden, sind für die nachfolgenden Klassen nicht mehr berücksichtigt worden, so daß die obige Reihenfolge entscheidend ist.

Abbildung 4.19 (li.) zeigt das Ergebnis einer wissensbasierten Klassifikation des Gewerbegebietes nach obigem Schema. Rechts daneben befindet sich die zum

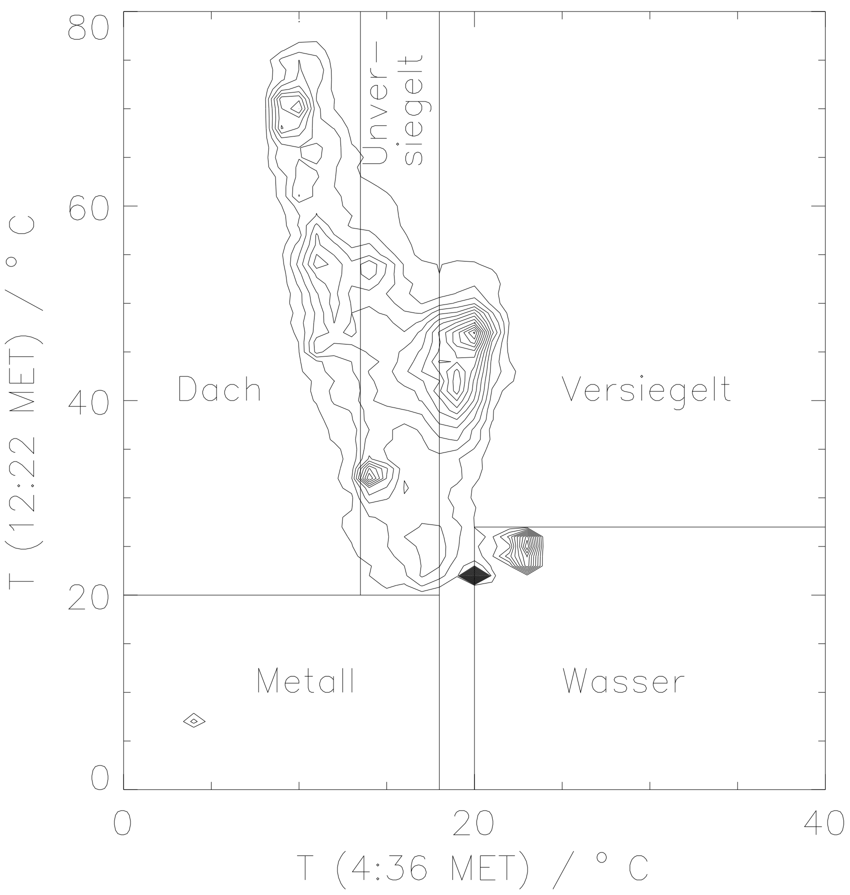


Abbildung 4.18: Multitemporaler Temperatur-Merkmalsraum. Eingezeichnet sind die Höhenlinien, die sich aus den Häufigkeiten aller Pixel der betrachteten Szene ergeben, sowie die Schwellwerte, die zur Klassifikation verwendet wurden

Vergleich hergestellte Referenzkarte. Diese Karte wurde mit überwachter Klassifikation und anschließender Nachbearbeitung erzeugt. Dazu wurde die Szene zunächst anhand der 10 Reflektanzkanäle mit dem *maximum likelihood*-Verfahren klassifiziert. Dann wurden per Hand die falsch klassifizierten Flächen den richtigen Klassen zugeordnet. Es wurde zu diesem Zweck ein Programm geschrieben, welches mit einem *flood-fill*-Algorithmus zusammenhängende Pixel der gleichen Farbe mit einem neuen Farbwert belegen kann. Der Benutzer kann eine Klasse, repräsentiert durch eine Farbe, auswählen und einen Punkt einer zu ändernden Fläche anklicken. Diese wird daraufhin der ausgewählten Klasse zugeordnet. Außerdem erlaubt das Programm, eine Fläche durch Zeichnen eines Polygons der richtigen Klasse zuzuordnen.

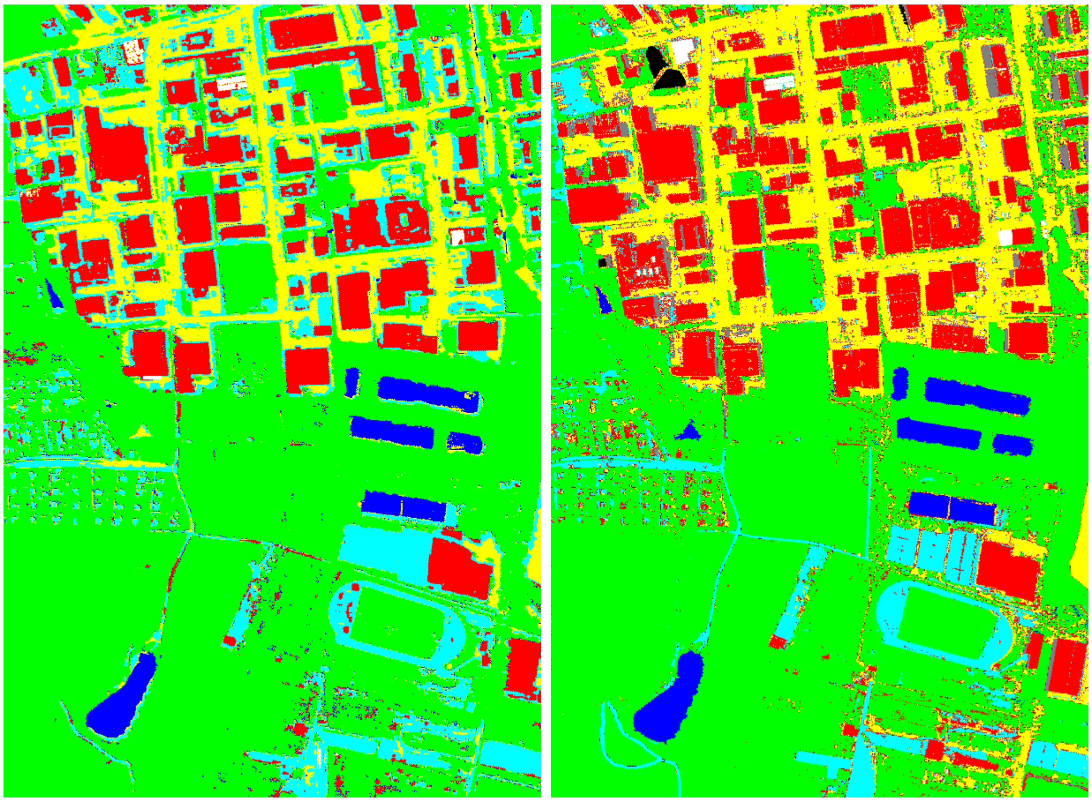
Natürlich beschreibt die Referenzkarte nur näherungsweise die wahre Bodenbedeckung des Gebietes. Hier mußte ein Kompromiß zwischen Genauigkeit und Zeitaufwand gefunden werden.

Bei der Herstellung der Karte wurde auch die neue Klasse „Fassade" hinzugefügt. Wegen der Aufnahmegeometrie sieht der Scanner teilweise große Teile der Häuserwände. Eine Klassifikation aufgrund der thermischen Eigenschaften war aber bei dieser Klasse nicht möglich, so daß sie in der Klassifikation fehlt. Auch die Klasse „unklassifiziert" ist nur in der Referenzkarte vorhanden. Hierunter wurden alle Objekte zusammengefaßt, die keiner der übrigen Klassen angehören (z. B. ein Schrottplatz).

Wasserflächen lassen sich mit dem oben beschriebenen Verfahren sehr gut finden, es werden nur wenige Pixel fehlklassifiziert. Bei den Metallflächen (weiß) ist die scheinbar niedrige Mittagstemperatur auf die niedrige Emissivität zurückzuführen. Das Verfahren kann auch Dächer (rot) gut von Straßen (gelb) unterscheiden, was allein aus der Reflektanzinformation selten möglich ist, da sich die optischen Eigenschaften der Materialien nicht sehr unterscheiden. Es fällt allerdings auch auf, daß einige Flächen (z. B. trockener Erdboden) sich sehr stark aufheizen und so fälschlicherweise als Dach klassifiziert werden.

Wie das Differenzbild in Abb. 4.19 zeigt, entsteht ein großer Teil der Fehlklassifikationen an den Rändern der Objekte. Die Ursachen sind die durch Schatten verursachten niedrigeren Mittagstemperaturen und Registrierungsungenauigkeiten, die durch die gröbere Auflösung der Morgenbilder noch verstärkt werden.

Wissensbasierte Klassifikation Referenzkarte



Differenz

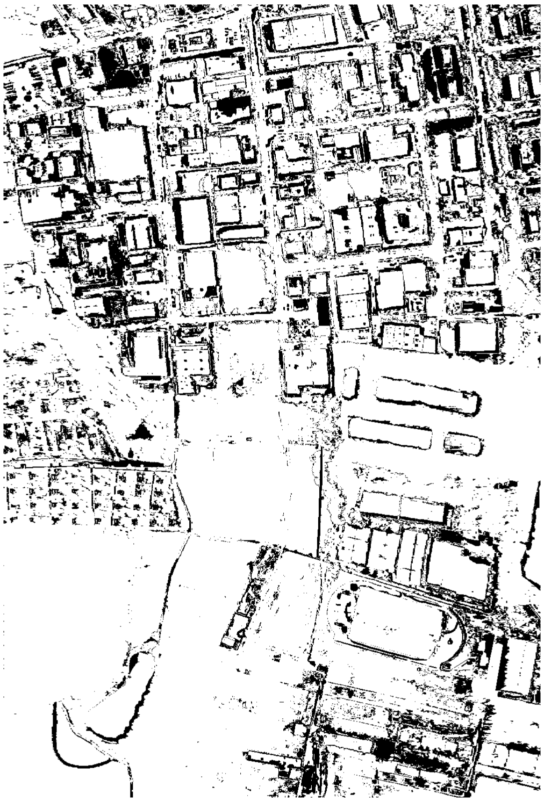


Abbildung 4.19: Wissensbasierte Klassifikation mit NDVI und Temperatur. Links oben: Ergebnis der Klassifikation. Rechts oben: Referenzkarte. Rechts: die Abweichungen von Klassifikation und Referenzkarte sind hier als schwarze Pixel sichtbar

Bestimmung der Klassifikationsgenauigkeit

In Tabelle 4.4 findet sich die Konfusionsmatrix der wissensbasierten Klassifikation aus Abb. 4.19. Es ergibt sich ein Kappa-Wert von $\kappa = 0{,}68$, also eine recht gute Übereinstimmung mit der *ground truth*-Karte. Am schwierigsten ist laut der Tabelle der Zuweisungsgenauigkeit die Klassifikation von unversiegeltem Boden (31%).

Da die Klassen „Unklassifiziert" und „Fassade" nur in der Referenzkarte vorhanden sind, ist die Wiedererkennungsgenauigkeit jeweils Null und die Zuweisungsgenauigkeit undefiniert.

Die Autoren der Dresdner Studie [NM97] schätzen die Fehlerquote für die Bestimmung des Versiegelungsgrades auf 5 – 15%. Die Zuweisungsgenauigkeiten – die für die Erstellung von Karten relevant sind – dieser Arbeit liegen für die meisten Bodenbedeckungsklassen bei 80%. Das hier verwendete Verfahren könnte eventuell etwas bessere Ergebnisse liefern, wenn zwei Temperaturdatensätze mit gleicher Auflösung zur Verfügung stünden. Insofern scheint eine Fehlerquote von 15% durchaus erreichbar zu sein.

Klassifikation \ Referenzkarte	Unklassifiziert	Dach	Fassade	Straße	Metall	Wasser	Vegetation	Unv. Boden	Σ
Unklassifiziert	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dach	511	157770	7401	21231	1801	178	3842	7864	200598
Fassade	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Straße	184	12403	13448	149566	1283	2692	4754	7221	191551
Metall	0	565	214	512	2739	20	37	281	4368
Wasser	0	43	66	1356	28	28654	2162	36	32345
Vegetation	318	8360	2048	49338	4	2232	754460	10003	826763
Unv. Boden	2362	46693	16375	72202	1592	3816	9444	67891	220375
Σ	3375	225834	39552	294205	7447	37592	774699	93296	1476000

Wiedererkennungsgenauigkeit (*producer's accuracy*):

Unklassifiziert	0/3375	0%
Dach	157770/225834	70%
Fassade	0/39552	0%
Straße	149566/294205	51%
Metall	2739/7447	37%
Wasser	28654/37592	76%
Vegetation	754460/774699	97%
Unv. Boden	67891/93296	73%

Zuweisungsgenauigkeit (*user's accuracy*):

Unklassifiziert	0/0	—
Dach	157770/200598	79%
Fassade	0/0	—
Straße	149566/191551	78%
Metall	2739/4368	63%
Wasser	28654/32345	89%
Vegetation	754460/826763	91%
Unv. Boden	67891/220375	31%

Tabelle 4.4: Konfusionsmatrix der wissensbasierten Klassifikation aus Abb. 4.19

4.4.2 Überwachte Klassifikation

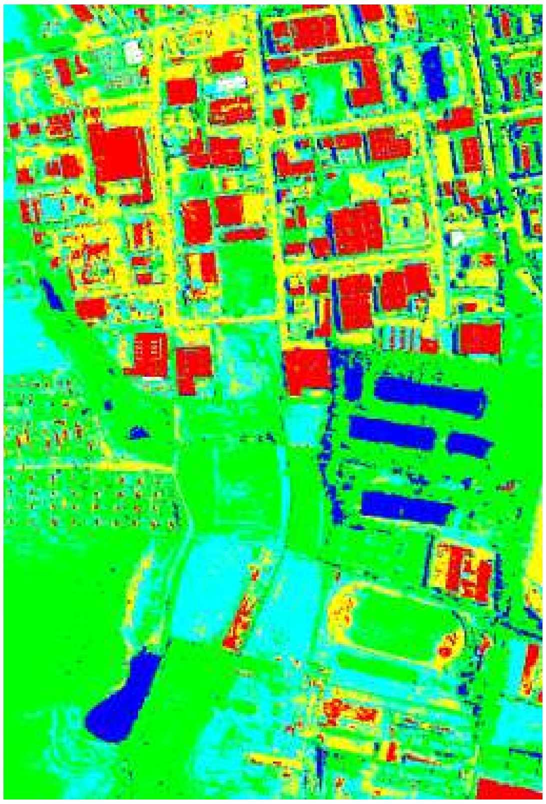
Der dreidimensionale Merkmalsraum, der aus den Temperaturbildern T_{mo} und T_{mi} und dem Vegetationsindex NDVI gebildet wird, kann wie ein multispektrales Reflektanzbild zur überwachten Klassifikation verwendet werden. Die beiden am häufigsten verwendeten Klassifikationsverfahren, das *minimum distance*- und das *maximum likelihood*-Verfahren wurden jeweils auf denselben Trainingsdatensatz angewendet. In Abb. 4.20 ist ein Beispiel dargestellt.

Tab. 4.5 zeigt die sich ergebenden Klassifikationsgenauigkeiten für zehn verschiedene Sätze von Trainingsgebieten. Es ist zu erkennen, daß die *maximum likelihood*-Methode zu deutlich besseren κ-Werten führt. Im Durchschnitt lag der κ-Wert der *minimum distance*-Klassifikation bei $0{,}34 \pm 0{,}02$, während das *maximum likelihood*-Verfahren $0{,}62 \pm 0{,}01$ erreichte.

	κ-Wert	
	minimum distance	*maximum likelihood*
1	0,40	0,63
2	0,39	0,58
3	0,32	0,64
4	0,41	0,58
5	0,28	0,62
6	0,36	0,65
7	0,31	0,56
8	0,37	0,57
9	0,23	0,68
10	0,30	0,68
	0,34 ± 0,02	0,62 ± 0,01

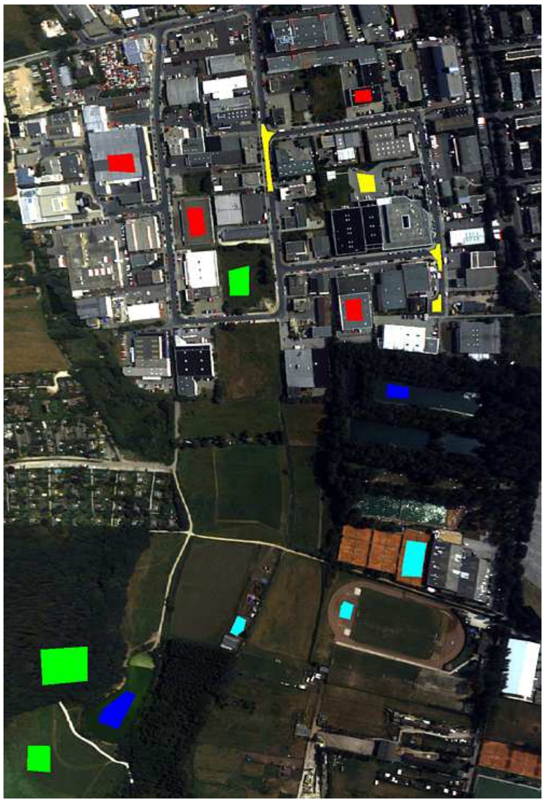
Tabelle 4.5: κ-Werte für die überwachte Klassifikation im NDVI-Temperatur-Merkmalsraum. Pro Zeile wurden jeweils dieselben Trainingsgebiete verwendet

minimum distance



maximum likelihood

Trainingsgebiete



Wasser
Vegetation
Straße
Dach
Unversiegelter Boden
Metall

Abbildung 4.20: Überwachte Klassifikation mit NDVI und Temperatur. Links oben: Klassifikation mit dem *minimum distance*-Verfahren. Rechts oben: Klassifikation mit dem *maximum likelihood*-Verfahren. Rechts: die für beide Klassifikationen verwendeten Trainingsgebiete

4.4.3 Unüberwachte Klassifikation

Es stellt sich die Frage, ob eine Klassifikation allein aufgrund von Temperaturinformationen ausreicht, z. B. Vegetation zu erkennen, ohne den NDVI zu verwenden. Hier soll der zweidimensionale Temperaturmerkmalsraum (aus T_{mo} und T_{mi}) für eine unüberwachte Klassifikation verwendet werden, die darauf abzielt, die Clusterzentren des Merkmalsraums direkt zu finden. Ausgehend von dem zweidimensionalen Histogramm (Abb. 4.18) im Temperaturmerkmalsraum können die Klassenmittelpunkte automatisch gefunden werden, indem in einer bestimmten Umgebung einiger Bins die größte Häufigkeit bestimmt wird.

Der verwendete Algorithmus sucht in einer 5×5-Umgebung eines jeden Bins (Größe der Bins: 1 °C × 1 °C) nach der maximalen Häufigkeit. Ein Punkt im Merkmalsraum wird aber erst dann als Clusterzentrum anerkannt, wenn die Häufigkeit mindestens 3 mal höher als der gemittelte Untergrund – gebildet aus den restlichen 24 Bins der Umgebung – ist. Die so gefundenen Peaks werden als Klassenmittelpunkte gewählt. Die Pixel werden dann mit dem Verfahren des geringsten euklidischen Abstands zu diesen Mittelpunkten klassifiziert. Eine Beispielklassifikation ist in Abb. 4.21 unten links als Grauwertbild dargestellt.

Das oben beschriebene Verfahren eignet sich nur für kleine Szenen. Bei der Klassifikation größerer Gebiete muß zuvor eventuell eine Zerlegung in Teilbereiche erfolgen. Umfaßt die zu klassifizierende Szene mehr als etwa 100.000 Pixel, wird der Untergrund so groß, daß wichtige Klassen verloren gehen. Im Klassifikationsergebnis in Abb. 4.21 (unten links) sind Vegetation und Wasser deutlich getrennt. Auch die Straße und die verschiedenen Dächer sind gut klassifiziert worden. Das Metalldach (schwarz), welches den Peak nahe dem Nullpunkt im Histogramm verursacht hat, ist ebenfalls gefunden worden. Bei einem größeren Szenenausschnitt fällt diese Klasse aber sicher weg, da der prozentuale Anteil der Pixel nicht ausreicht.

Anders als z. B. beim *migrating means*-Verfahren muß bei dem hier dargestellten Verfahren die Anzahl der Klassen nicht vorgegeben werden. Wie alle unüberwachten Klassifikationen hat es aber den Nachteil, daß die letztendliche Einteilung der Klassen in Bodennutzungsklassen vom Benutzer geleistet werden muß.

Für eine weitergehende Diskussion der unüberwachten Klassifikation multitemporaler Temperaturbilder siehe [FPWS98].

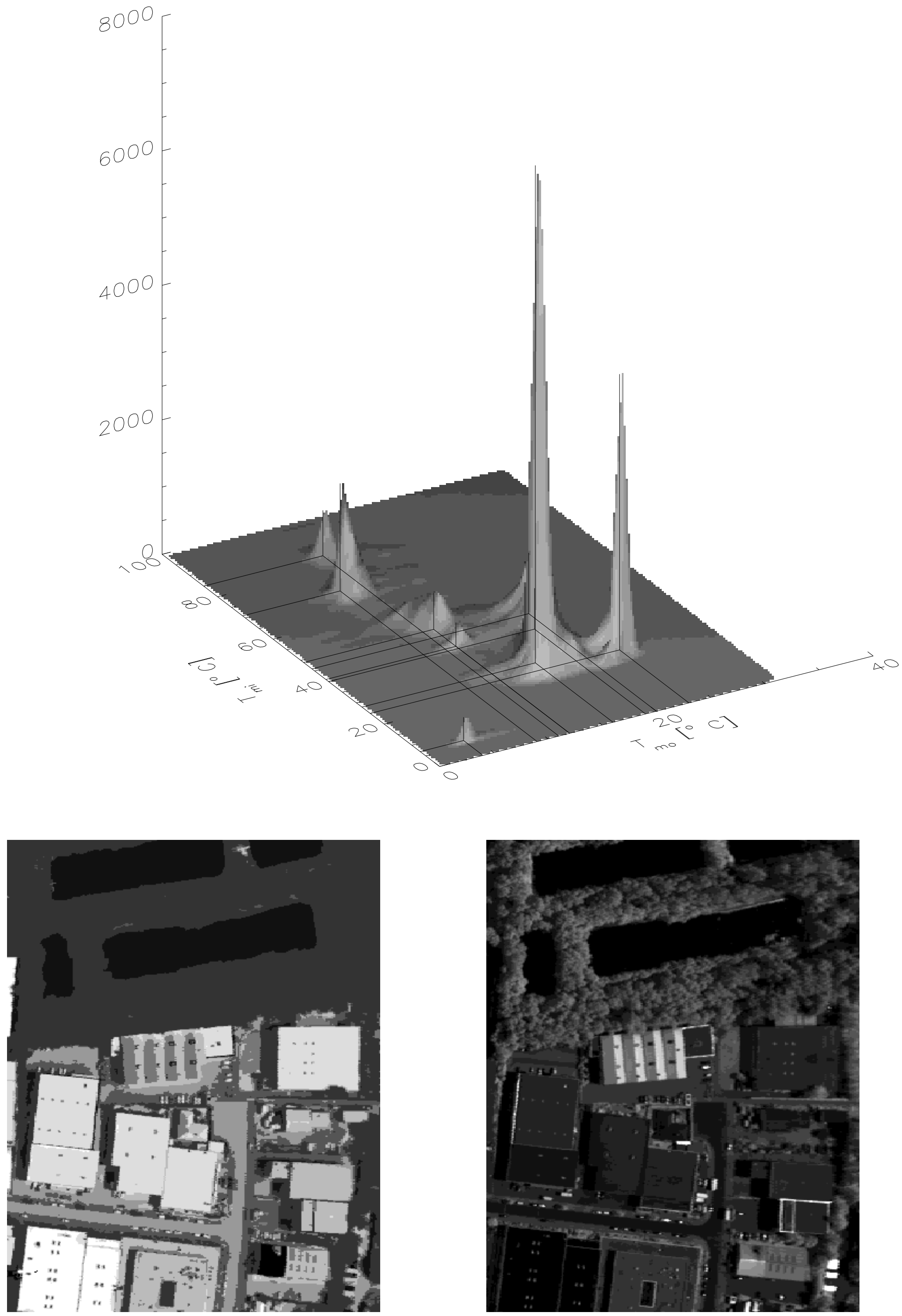


Abbildung 4.21: Oben: Histogramm des Temperaturmerkmalsraums, gebildet aus den Temperaturen um 4:36 und 12:22 MEZ. Es wurden 9 Klassen gefunden. Die gefundenen Klassenmittelpunkte sind durch Linien kenntlich gemacht. Links: *minimum distance*-Klassifikation. Rechts: Kanal 7 der Szene zum Vergleich

4.5 Betriebszustände von Anlagen und Fahrzeugen

In Abbildung 4.22 ist ein Ausschnitt der morgendlichen Überfliegung (ca. 5 Uhr MEZ, Flughöhe 900 m) des Nürnberger Flughafens dargestellt. Bei diesem Bild wurde die Atmosphärenkorrektur mit einer Emissivität von $\epsilon = 0{,}95$ durchgeführt, was einen guten Mittelwert für Vegetation und auch künstliche Flächen darstellt. Dies hat allerdings zur Folge, daß Metallflächen durch ihre geringere Emissivität als zu kalt dargestellt werden. Bei den meisten Flugzeugen strahlen die Tragflächen weniger thermische Energie ab als der Rumpf. Dies könnte daran liegen, daß die Tragflächen nicht lackiert sind, und daher eine geringere Emissivität haben (Emissivitäten von Lacken liegen bei 0,97 [Koh96]).

Bei so großen Objekten wie Flugzeugen, die zudem noch viel Wärme abgeben, ist es – wie in Abb. 4.22 zu sehen – recht einfach, den Betriebszustand (laufende Triebwerke) mit thermaler Fernerkundung festzustellen. Ebenfalls zu erkennen sind Versorgungsfahrzeuge und laufende Dieselstromaggregate neben den Flugzeugen in der rechten Bildhälfte. Nicht gelungen ist der Nachweis der Betriebszustände von Automobilen auf den vorliegenden Bildern. Hierzu reichte die Bodenauflösung von ca. 2 bis 4 m bei einer Flughöhe von 900 m nicht aus. Bei den Mittagsmessungen, die eine Auflösung von 0,70 m bis 1,40 m haben (300 m Flughöhe), sind die Temperaturunterschiede z. B. von warmen Motoren zu ihrer Umgebung zu gering, um zu sichtbaren Merkmalen zu führen. Zudem sind die Temperaturen insofern nicht genau bestimmt, als die Emissivität der Materialien grundsätzlich nicht bekannt ist, was vor allem bei Metallflächen eine Rolle spielt.

Im Rahmen des Open-Skies-Vertrages [Spi96] sind Thermalscanner mit einer Bodenauflösung von 50 cm zugelassen. Mit einer solchen Bodenauflösung sollten sich Fahrzeuge mit laufendem oder noch warmem Motor – bei Nacht – von abgestellten Fahrzeugen mit kaltem Motor unterscheiden lassen.

Fahrzeuge, die ihren Standplatz verlassen haben, hinterlassen tagsüber häufig einen thermalen Schatten, da sich der Boden unter dem Fahrzeug nicht so stark aufheizt wie die Umgebung. Dies läßt sich in Abb. 4.23 (rechts) erkennen. Das Temperaturbild zeigt die thermalen Schatten (weniger aufgeheizte Bodenflächen) von vier Flugzeugen, die inzwischen ihren Standplatz verlassen haben. Das Reflektanzbild (links) enthält keine Hinweise auf die Flugzeuge.

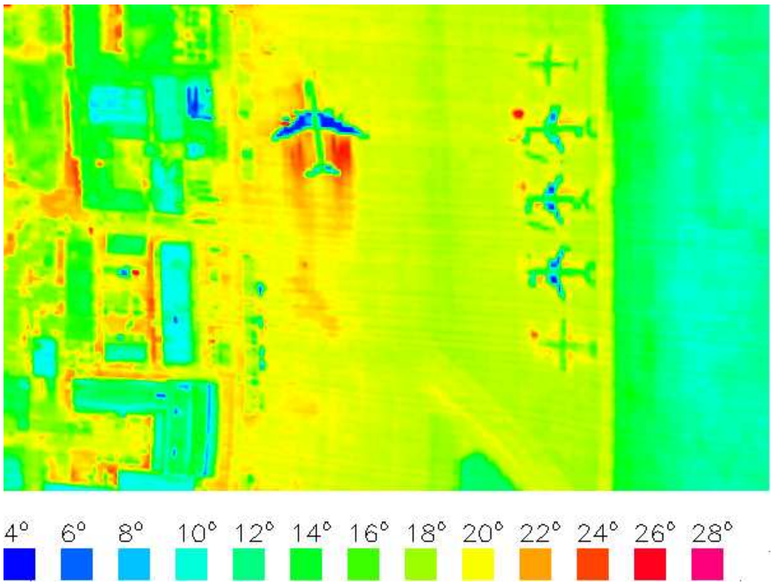


Abbildung 4.22: Thermalaufnahmen des Nürnberger Flughafens aus 900 m Höhe (26. 8. 97, ca. 5 Uhr MEZ). Emissivität $\epsilon = 0{,}95$

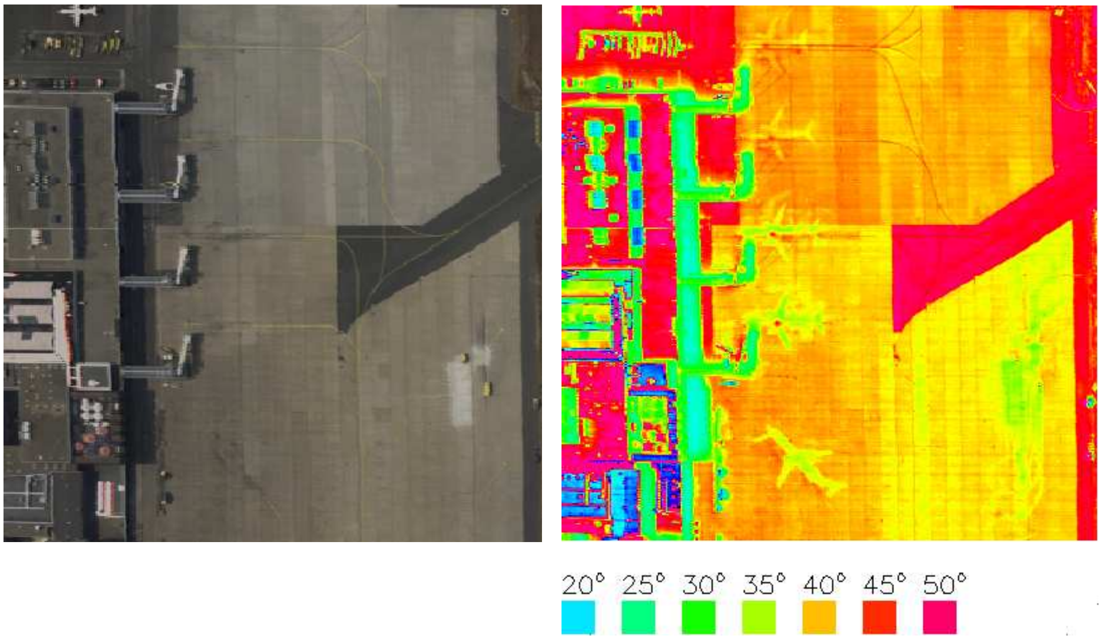


Abbildung 4.23: Daedalus-Aufnahmen des Nürnberger Flughafens, Höhe 300 m, 26. 8. 1997, 12:30 MEZ. Links: Reflektanzbild (RGB), rechts: Thermalbild. Emissivität $\epsilon = 0{,}95$

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Thermalbilder eines Multispektralscanners kalibriert und ausgewertet. Die Bilder stammen von dem flugzeuggetragenen Scanner Daedalus AADS 1268, der im Wellenlängenbereich von 8,5 μm bis 13 μm für thermische Infrarotstrahlung empfindlich ist. Da der Detektor keinen weiteren thermischen Kanal besitzt, ist es nicht möglich, die Emissivität, die den Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und der beobachteten Strahlungstemperatur herstellt, direkt aus den Daten zu bestimmen. Es wurde darauf verzichtet, die Bilder zu klassifizieren und den Bodenbedeckungstypen Literaturwerte für Emissivitäten zuzuordnen. Der Grund dafür ist, daß Literaturwerte nur grobe Anhaltspunkte für die zu erwartende Emissivität sein können [SHL88]. Stattdessen wurde durchgehend eine Emissivität von $\epsilon = 0{,}95$ verwendet. Hierdurch wird die Temperatur von Metallen unterschätzt.

Parallel zu einer Überfliegung des Nürnberger Flughafens und der umgebenden städtischen Gebiete am 26. August 1997 wurden mit Temperaturaufzeichnungsgeräten die Oberflächentemperaturen von fünf Materialien über 24 Stunden gemessen. Die verwendeten Thermoelemente wurden im Rahmen dieser Arbeit modifiziert und kalibriert; sie erreichen eine Genauigkeit von $\pm 1{,}5$ °C.

Zur Kalibration der Scannertemperaturen wird zwischen zwei detektorinternen Schwarzkörperstrahlern mit bekannten Temperaturen für jede Scanzeile eine Interpolation durchgeführt. Ist die Temperaturdifferenz der beiden Strahler gering (bis etwa 20 °C), so ist eine lineare Interpolation möglich. Bei einer Differenz von 40 °C tritt allerdings ein Fehler von bis zu 10 °C bei hohen Detektorgrauwerten, bzw. von 2 °C zwischen den Schwarzkörperstrahlern auf. Aus diesem Grund wurde die Beziehung zwischen der integralen Strahldichte am Detektor und der Temperatur aus dem Planckschen Gesetz abgeleitet. Dazu wurde die theoretische Strahldichtefunktion mit der Gesamtfilterfunktion des Detektors gewichtet und numerisch integriert. Aufgrund des Detektorrauschens, des Digitalisierungsfehlers und der Meßungenauigkeit der Temperaturen der Schwarzkörperstrahler beträgt die interne Unsicherheit der Strahlungstemperaturen des Detektors etwa $\pm 0{,}4$ °C.

Zur Korrektur der Scannerdaten auf den Einfluß der Atmosphäre wurde das Programm SENSAT-5 verwendet [Ric94]. Es wurde gezeigt, daß die Wahl der Atmosphäre, d. h. der Profile von Luftfeuchte und Temperatur, einen großen Einfluß auf die Korrektur hat. Aktuelle Radiosondendaten des überflogenen Gebietes sind daher sehr wichtig. Es stellte sich heraus, daß die Wahl des Aerosoltyps und der Sichtweite einen sehr geringen Einfluß ausüben. Entscheidend für die Absorption im thermischen Infrarot ist der Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre.

Das Ergebnis einer SENSAT-Prozessierung sind zwei Stützpunkte, die jeweils eine Oberflächentemperatur auf dem Boden und die entsprechende Schwarzkörpertemperatur am Sensor enthalten. Mehrere Prozessierungen haben gezeigt, daß eine lineare Interpolation zwischen zwei Stützpunkten eine sehr gute Näherung darstellt.

Die hier beobachtete Übereinstimmung von mit Thermoelementen gemessenen kinetischen Temperaturen und den atmosphärenkorrigierten Strahlungstemperaturen ist im Rahmen der Gesamtfehler von (2 – 3) °C recht gut. Bei dem Gesamtfehler werden Inhomogenitäten, wie sie bei Bodenflächen einer Nutzungsklasse von 4 bis 20 m^2 auftreten können, mit erfaßt. Auch eine mittlere Emissivität von 0,95 ist gut mit den Meßwerten verträglich.

Die Voraussetzungen für eine solche Genauigkeit sind homogenen Flächen und eine beständige Atmosphäre. Bei Wolkenbildung sind Schwankungen der ankommenden Solarstrahlung zu groß. Die Atmosphärenkorrektur wird wegen des hohen Wasserdampfgehalts unsicher. Außerdem ist die Übereinstimmung von Strahlungstemperaturen und den von den Thermoelementen gemessenen kinetischen Temperaturen schlecht bei inhomogenen Flächen. In dieser Arbeit zeigte sich das bei der Messung auf einer sehr unterschiedlich dicht bewachsenen Wiese.

Die Anpassung eines einfachen Modells an die Tagestemperaturverläufe erlaubt eine Bestimmung der thermischen Trägheit. Die so erhaltenen Trägheiten liegen bei etwa 2000 $J/(m^2\ s^{1/2}\ K)$. Lediglich die Dachfläche hat aufgrund ihrer Geometrie (isolierende Luftschicht) die geringere thermische Trägheit von ca. 1200 $J/(m^2\ s^{1/2}\ K)$.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Klassifikation von multispektralen Luftbildern unter Hinzunahme des Thermalkanals. Dazu wurde Bildmaterial, das zu zwei Tageszeiten aufgenommen wurde, aufeinander registriert. Dann wurde in dem entstehenden multitemporalen Merkmalsraum klassifiziert. Auch der Vegetationsindex NDVI wurde verwendet, da er für die Klassifikation von Vegetation am besten geeignet ist. Die Temperaturinformation allein reichte hierfür nicht aus.

Es hat sich gezeigt, daß der Thermalkanal des Daedalus die Reflektanzkanäle in sinnvoller Weise ergänzen kann. Insbesondere kann Wasser gut detektiert und von Schatten unterschieden werden. Weiterhin ist eine gute Unterscheidung zwischen Dächern und Straßen möglich. Dieses ist allein mit Reflektanzbildern nicht gut möglich, da sich die optischen Eigenschaften der Materialien nicht deutlich unterscheiden. Eine bessere Unterscheidungsmöglichkeit ist hier die thermische Trägheit. Metallflächen werden gut erkannt, da sie aufgrund ihrer geringen Emissivität sehr kalt erscheinen. Problematisch ist die Erkennung von unversiegeltem Boden, der nicht von Vegetation bedeckt wird. Die Verwechslung mit Straßen ist besonders hoch.

Die Klassifikationsgenauigkeit der wissensbasierten Klassifikation im Temperatur-NDVI-Merkmalsraum mit Schwellwerten kann unter den Bedingungen dieser Arbeit mit einem Kappa-Wert von 0,68 angegeben werden. Ein ähnliches Ergebnis liefert eine *maximum likelihood*-Klassifikation im Temperatur-NDVI-Raum (κ = 0,62). Die *minimum distance*-Klassifikation mit denselben Trainingsgebieten erreicht nur eine Genauigkeit von etwa $\kappa = 0{,}34$.

Bei einer Flughöhe von 900 m können nur große Objekte (wie z. B. Flugzeuge am Boden) hinsichtlich ihrer Betriebszustände untersucht werden. Für Fahrzeuge reicht die Auflösung von ca. 2 bis 4 m nicht aus.

Ausblick

Diese Arbeit war auf die Kalibrierung verschiedener Thermalsensoren und auf die Methodenentwicklung zur Klassifizierung mit Hilfe von multitemporalen Thermalbildern ausgerichtet. Daher wurden nur einzelne Szenen eines insgesamt wesentlich umfangreicheren Bildmaterials der Stadt Nürnberg (vgl. Abb. 3.1) ausgewertet. Die entwickelten Verfahren lassen sich auf die Gesamtfläche übertragen. Als Ergebnis sollte es möglich sein, Thermalbilder von städtischen Oberflächentemperaturen zu verschiedenen Tageszeiten mit einer Genauigkeit von 2 bis 3 °C zu erstellen (außer für nichtlackierte Metallflächen). In einem weiteren Arbeitsschritt kann das gesamte Bildmaterial georeferenziert werden, um Thermalkarten zu erhalten, die in geographische Informationssysteme eingespeist werden können.

Flugzeug- und helikoptergetragene Sensoren werden auf absehbare Zeit ein Monopol für die Thermalkartierung städtischer Gebiete behalten, da die in Planung befindlichen satellitengestützten Sensoren im Thermalkanal wesentlich gröbere Bodenauflösung haben werden. Der Satellit Landsat-7 z. B. (Start verschoben auf 15. April 1999) liefert eine räumliche Auflösung von 60 m im thermischen Infrarot [MGH$^+$97]. Der Sensor ASTER an Bord des EOS AM-1-Satelliten (Start frühestens Ende 1998) besitzt fünf Thermalkanäle mit einer Bodenauflösung von 90 m [GKM97]. Die geplanten Satelliten mit hochauflösenden Sensoren, die panchromatische Bilder mit bis zu 1 m Auflösung liefern werden, wie z. B. QuickBird, EarlyBird, OrbView-3 und Ikonos, besitzen keine Sensoren für thermisches Infrarot [SB97].

Danksagung

Bei Prof. Hartwig Spitzer und Prof. Johann Bienlein bedanke ich mich für das interessante Thema und die intensive Betreuung meiner Diplomarbeit.

Ramon Franck danke ich für die Einführung in das Thema und die zahlreichen Anregungen und Diskussionen, die mir eine große Hilfe waren.

Allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe danke ich für die freundliche Arbeitsatmosphäre, die hilfreichen Tips und nicht zuletzt die Unterstützung bei den Bodenmessungen. Besonderer Dank gilt André Rothkirch für die Beschaffung und Hilfe bei der Kalibration der Temperaturaufzeichnungsgeräte. In diesem Zusammenhang sei auch Frank Holweg vom Institut für Laser-Physik der Universität Hamburg gedankt, der uns den Apparat zur Kalibration zur Verfügung stellte.

Bei dem DLR bedanke ich mich für die Bereitstellung der Daten, besonders bei Volker Amann, Peter Hausknecht, Rudolf Richter und Manfred Schröder. Außerdem sei den Mitarbeitern des Flughafens Nürnberg für ihre unbürokratische Hilfe gedankt, die uns die Bodenmessungen ermöglichte.

Literaturverzeichnis

[AC82] David A. Artis and Walter H. Carnahan. Survey of Emissivity Variability in Thermography of Urban Areas. *Remote Sensing of Environment*, 12:313–329, 1982.

[AKC+95] G. P. Anderson, F. X. Kneizys, J. H. Chetwynd, J. Wang, M. L. Hoke, L. S. Rothman, L. M. Kimball, R. A. McClatchey, E. P. Shattle, S. A. Clough, W. O. Gallery, L. W. Abreu, and J. E. A. Selby. FASCODE / MODTRAN / LOWTRAN : Present / past / future. In *Proceedings of the 18th Annual Review Conference on Atmospheric Transmission Models, June 6–8*, 1995.

[Ama98] Volker Amann. Persönliche Mitteilung, 1998. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen.

[Bad97] C. Badenas. Comments on Kirchhoff's law in thermal-infrared remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 18:229–234, 1997.

[Bra92] Siegmund Brandt. *Datananalyse.* BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 1992.

[Con91] R. Congalton. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 37:35–46, 1991.

[CX96] A. P. Cracknell and Y. Xue. Thermal inertia determination from space—a tutorial review. *International Journal of Remote Sensing*, 17:431–461, 1996.

[Ela87] Charles Elachi. *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing.* John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1987.

[FPWS98] Ramon Franck, Boris Prinz, Rafael Wiemker, and Hartwig Spitzer. Study of Sealed Surfaces and Diurnal Temperature Variations in Urban Environments with Airborne Scanner Data. In *Proceedings of the ISPRS Commission VII Symposium, ECO BP'98, WG 3, September 1-4, 1998, Budapest, International Symposium on Resource and Environmental Monitoring - Local, Regional, Global*, 1998.

[Fri97] Fritz. Persönliche Mitteilung, 1997. Luftwaffenkommando Süd, GeophysMZg KUEM, Kümmersbruck.

[GKM97] Alan R. Gillespie, Anne B. Kahle, and Andrew D. Morrison. ASTER Contributions to Earth Systems Science. In *Land Satellite Information in the Next Decade II: Sources and Applications.* American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, 1997.

[KK93] Charles Kittel und Herbert Krömer. *Physik der Wärme.* Oldenbourg Verlag, München, 1993.

[Koh96] Friedrich Kohlrausch. *Praktische Physik.* B.G. Teubner, Stuttgart, 1996.

[KS88] Karl Kraus und Werner Schneider. *Fernerkundung*, Band 1: Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn, 1988.

[Kuc91] Horst Kuchling. *Taschenbuch der Physik.* Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt/Main, 1991.

[Kul97] Daniel Kulbach. *Systematischer Vergleich von Verfahren zur überwachten Klassifikation von multispektralen Luftbildern mit Bodenauflösungen im Meterbereich.* Diplomarbeit, Universität Hamburg, CENSIS-Report 29-97, 1997.

[Lip95] Kerstin Lippert. *Bestimmung von Landoberflächentemperaturen aus Flugzeug- und Satellitendaten.* Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, 1995.

[Man94] H. Mannstein. Land Surface Energy Budget. In Robin A. Vaughan and Arthur P. Cracknell, editors, *Remote Sensing and Global Climate Change*, volume 24 of *NATO ASI Series.* Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1994.

[Mei96] Gerhard Meister. *Messung der spektralen Reflektionsfunktion (BRDF) ausgewählter Oberflächen bei natürlicher Beleuchtung.* Diplomarbeit, Universität Hamburg, CENSIS-Report 18-96, 1996.

[MGH+97] Jeffrey G. Masek, Samuel Goward, Jonathan Haskett, Darrel Williams, and James Irons. Landsat-7's Mission to Planet Earth. In *Land Satellite Information in the Next Decade II: Sources and Applications.* American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, 1997.

[NM97] Maik Netzhand und Gotthard Meinel. Aspekte städtischer Versiegelungserhebung einschließlich GIS-technischer Weiterverarbeitung. In *Fernerkundung in Urbanen Räumen.* Heft 28 der *Regensburger*

Geographische Schriften, Institut für Geographie an der Universität Regensburg, 1997.

[OFE97] M. J. Ortiz, A. R. Formaggio, and J. C. N. Epiphanio. Classification of croplands through integration of remote sensing, GIS and historical database. *International Journal of Remote Sensing*, 18:95–105, 1997.

[PdDUK83] R. Piessens, E. de Doncker, C. W. Uberhuber, and D. K. Kahaner. *QUADPACK: A Subroutine Package for Automatic Integration.* Springer-Verlag, New York, 1983.

[Pri77] John C. Price. Thermal Inertia Mapping: A New View of the Earth. *Journal of Geophysical Research*, 82:2582–2590, 1977.

[PTVF92] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery. *Numerical Recipes in C.* Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

[RB85] Rudolf Richter und Kurt Beier. *Vergleich von Messung und Modellrechnung der Strahlungstemperatur am Beispiel der Thermalkartierung München.* Forschungsbericht Nr. 86-05, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Optoelektronik, Oberpfaffenhofen, 1985.

[Ree90] W. G. Rees. *Physical Principles of Remote Sensing.* Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

[Ric92] Rudolf Richter. *Radiometrische Auslegung von Sensoren und quantitative Auswertung von Fernerkundungsdaten im optischen Spektralbereich.* Forschungsbericht Nr. 92-01, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Optoelektronik, Oberpfaffenhofen, 1992.

[Ric93] John A. Richards. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction.* Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, 1993.

[Ric94] Rudolf Richter. *Model SENSAT-5: Sensor-Atmosphere-Target.* DLR, Institute for Optoelectronics, Wessling, 1994.

[SB97] William E. Stoney and Stacy L. Bunin. Satellite and Sensor Data Sheets. In *Land Satellite Information in the Next Decade II: Sources and Applications.* American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, 1997.

[SHL88] Robert Siegel, John R. Howell, und Joachim Lohrengel. *Wärmeübertragung durch Strahlung.* Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1988.

[Spi96] Hartwig Spitzer. The Open-Skies Treaty as a tool for confidence building and arms control verification. In *Proceedings of the 18th ISODARCO Summer Course: The Weapons Legacy of the Cold War – Technical problems and opportunities, Certosa di Pontignano, Siena, Italy, 29th July – 8th August*, 1996.

[Wal89] Wilhelm Walcher. *Praktikum der Physik.* B.G. Teubner, Stuttgart, 1989.

[Wat82] Kenneth Watson. Regional thermal-inertia mapping from an experimental satellite. *Geophysics*, 47:1681–1687, 1982.

[Wie96] Rafael Wiemker. Registration of Airborne Scanner Imagery Using Akima Local Quintic Polynomial Interpolation. In *Proceedings of the Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco 1996*, volume III, pages 210–219, Ann Arbor, 1996.

[XC95] Y. Xue and A. P. Cracknell. Advanced thermal inertia modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 16:431–446, 1995.

[Zis93] George J. Zissis, editor. *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, volume 1, *Sources of Radiation.* Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan USA, 1993.

A Gesamtfehler der Temperaturbestimmung mit dem Daedalus-Detektor

Die Abhängigkeit der Temperatur T von den Szenengrauwerten D ergibt sich aus den Gleichungen (4.3) und (4.4):

$$T(D) = -\frac{a_1}{2a_2} + \sqrt{\frac{a_1^2}{4a_2^2} - \frac{a_0}{a_2} + \frac{1}{a_2}\left[L_1 + \frac{L_2 - L_1}{D_2 - D_1}(D - D_1)\right]},$$

wobei die Abkürzungen $D_i = D_{\mathrm{BB}i}$ und

$$L_i = L(T_{\mathrm{BB}i}) = a_0 + a_1 T_{\mathrm{BB}i} + a_2 T_{\mathrm{BB}i}^2$$

verwendet wurden. Die Parameter $T_{\mathrm{BB}i}$ und $D_{\mathrm{BB}i}$ werden für jede Scanzeile aufgezeichnet. Die Parameter a_0, a_1 und a_2 sind aus der Gesamtfilterfunktion des Detektors und dem Planckschen Gesetz ermittelt worden, also unabhängig von den Flugparametern.

Nun sind alle Grauwerte D, D_1, D_2 mit dem Fehler σ_D behaftet, der sich aus dem Digitalisierungsfehler ($\pm\frac{1}{2}$ Grauwert) und dem Rauschen des Detektors ergibt. Außerdem muß angenommen werden, daß auch die Temperaturen der Schwarzkörperstrahler nur mit einer bestimmten Genauigkeit gemessen werden können (Fehler $\sigma_{T_{\mathrm{BB}}}$). Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz [Bra92] gilt also für den Gesamtfehler der Temperatur:

$$\begin{aligned}\sigma_T \; = \; & \left[\left(\frac{\partial T}{\partial D}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial D_1}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial D_2}\right)^2 \sigma_D^2 + \right. \\ & \left. \left(\frac{\partial T}{\partial T_{\mathrm{BB1}}}\right)^2 \sigma_{T_{\mathrm{BB}}}^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial T_{\mathrm{BB2}}}\right)^2 \sigma_{T_{\mathrm{BB}}}^2\right]^{\frac{1}{2}} .\end{aligned} \tag{A.1}$$

Die einzelnen Terme sind:

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial T}{\partial D}\right)^2 &= A \cdot \frac{(L_2 - L_1)^2}{(D_2 - D_1)^2} \\
\left(\frac{\partial T}{\partial D_2}\right)^2 &= A \cdot \frac{(D - D_1)^2 (L_2 - L_1)^2}{(D_2 - D_1)^4} \\
\left(\frac{\partial T}{\partial D_1}\right)^2 &= A \cdot \left[\frac{(D - D_1)(L_2 - L_1)}{(D_2 - D_1)^2} - \frac{L_2 - L_1}{D_2 - D_1}\right]^2 \\
\left(\frac{\partial T}{\partial T_{\mathrm{BB1}}}\right)^2 &= A \cdot (a_1 + 2a_2 T_{\mathrm{BB1}})^2 \cdot \left(1 - \frac{D - D_1}{D_2 - D_1}\right)^2
\end{aligned}$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial T_{\mathrm{BB2}}}\right)^2 \quad = \quad A \cdot \frac{(a_1 + 2a_2 T_{\mathrm{BB1}})^2 (D - D_1)^2}{(D_2 - D_1)^2},$$

mit dem gemeinsamen Faktor

$$A = \frac{1}{4a_2^2}\left(\frac{a_1^2}{4a_2^2} - \frac{a_0}{a_2} + \frac{1}{a_2}\left[L_1 + \frac{L_2 - L_1}{D_2 - D_1}(D - D_1)\right]\right)^{-1}.$$

B Fehler der thermischen Trägheit

Der Fehler der nichtlinearen Anpassung der Oberflächentemperatur an die Meßwerte wird nach dem Verfahren von [Bra92, Mei96] berechnet. Der Fall der nichtlinearen Anpassung wird auf den linearen Fall zurückgeführt, indem die anzupassende Funktion f_j nach Taylor entwickelt wird. Die Reihe wird nach dem ersten Glied abgebrochen. Man erhält also eine lineare Funktion, deren Fehler durch die Fehlerfortpflanzung berechnet werden kann. Die Kovarianzmatrix der angepaßten Funktion ist gegeben durch

$$C_{\vec{x}} = (A^{\mathrm{T}} C_{\vec{y}}^{-1} A)^{-1}, \tag{B.1}$$

mit den Bezeichnungen:

$$\begin{aligned}
A &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1r} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nr} \end{pmatrix} \\
n &= \text{Anzahl der Meßwerte (ca. 1440)} \\
a_{jl} &= -\frac{\partial f_j}{\partial x_l} \\
r &= \text{Anzahl der Parameter (in diesem Fall 3)} \\
x_l &= \text{Fitparameter } (l = 1, \dots, r) \\
\vec{y} &= \text{Vektor der Meßwerte (hier: die Oberflächentemperaturen)} \\
A^{\mathrm{T}} &= \text{Transponierte Matrix von } A \\
C_{\vec{y}} &= \text{Kovarianzmatrix der Meßwerte}
\end{aligned}$$

Im vorliegenden Fall ist die Kovarianzmatrix der Meßwerte gegeben durch

$$C_{\vec{y}} = \sigma_T^2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix},$$

wobei der Fehler der Temperaturaufzeichnungsgeräte zu $\sigma_T = 1{,}5$ °C bestimmt wurde.

Die Fitparameter x_l im Falle der Anpassung des Modells aus [XC95], gegeben durch Gl. (2.7), sind A_c, B, und die thermische Trägheit P.

Aus Gl. (2.7) folgt:

$$\frac{\partial T}{\partial A_C} = \frac{1}{B},$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial B} &= -\frac{A_c}{B^2} + (1-A)S_0\tau_{\text{atm}} \cdot \\
&\quad \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left[-\frac{(2B + \sqrt{2n\omega}P)\cos(n\omega t - \delta_n) + \sqrt{2n\omega}P\sin(n\omega t - \delta_n)}{2(\omega n P^2 + \sqrt{2n\omega}BP + B^2)^{3/2}} \right], \\
\frac{\partial T}{\partial P} &= (1-A)S_0\tau_{\text{atm}} \cdot \\
&\quad \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left[-\frac{(2n\omega P + \sqrt{2n\omega}B)\cos(n\omega t - \delta_n) - \sqrt{2n\omega}B\sin(n\omega t - \delta_n)}{2(\omega n P^2 + \sqrt{2n\omega}BP + B^2)^{3/2}} \right].
\end{aligned}$$

Damit sind die Koeffizienten der Matrix A bestimmt. Es ergibt sich aus Gl. (B.1):

$$C_{\vec{x}} = \begin{pmatrix} \sigma_{A_c}^2 & \times & \times \\ \times & \sigma_B^2 & \times \\ \times & \times & \sigma_P^2 \end{pmatrix},$$

wobei σ_P der gesuchte Fehler der thermischen Trägheit ist.

C Symbolverzeichnis

Symbol	Name	SI-Einheit
ϵ	Emissionsgrad, Emissivität	—
ρ	Reflexionsgrad	—
A	Albedo	—
τ_{atm}	Transmissionsgrad der Atmosphäre	—
Φ_{r}	reflektierter Strahlungsfluß	W
Φ_{e}	einfallender Strahlungsfluß	W
L	spektrale Strahldichte	W m^{-3} sr^{-1}
L_{int}	relative integrale Strahldichte (gewichtet mit Filterfunktion des Detektors)	W m^{-3} sr^{-1}
D	Detektorzählrate, Counts, Grauwert	—
T	Kinetische Temperatur	K
T_{surf}	Oberflächentemperatur	K
T_{BB}	Strahlungstemperatur ($\epsilon = 1$)	K
$T_{\mathrm{BB1,2}}$	Temperatur eines Schwarkörperstrahlers	K
P	Thermische Trägheit	J m^{-2} K^{-1} $\mathrm{s}^{-1/2}$
K	Thermische Leitfähigkeit	J m^{-1} K^{-1} s^{-1}
c	Spezifische Wärmekapazität	J kg^{-1} K^{-1}
δ	Solare Deklination	$\circ$
α	Breitengrad	$\circ$
A_c	Linearisierungsparameter der ein- ...	W m^{-2}
B	... und austretenden Wärmeflüsse	W m^{-2} K^{-1}
DN	Digital number der C-Control-Unit	—

Konstanten:

Symbol	Bedeutung	Größe
c_1	$hc^2\mathrm{sr}^{-1}$	$1{,}19\times10^{-16}$ W m^2 sr^{-1}
c_2	hc/k	$1{,}439\times10^{-2}$ K m
S_0	Solarkonstante	1375 W m^{-2}