

Thermalkartierung zur Feststellung von Bodenversiegelung und Betriebszuständen von Fahrzeugen

Boris Prinz, Ramon Franck, Johann Bienlein, Hartwig Spitzer

II. Institut für Experimentalphysik
Universität Hamburg
KOGS, Vogt-Kölln-Str. 30, 22527 Hamburg
<http://kogs-www.informatik.uni-hamburg.de/PROJECTS/Censis.html>

Zusammenfassung

Thermalkartierung dient sowohl zur Untersuchung von Baubeständen in bewohnten Gebieten (Versiegelungsstudien, Wärmebilder) als auch zur Feststellung von Betriebszuständen von Anlagen und Fahrzeugen. In dieser Studie sind städtische Gebiete mit einem Multispektral-Scanner (Daedalus AADS 1268) überflogen worden. Aus den Rohdaten sind nach Korrektur auf den Einfluß der Atmosphäre Temperaturbildkarten erstellt worden. Die Temperatur-Information wird zusammen mit dem Vegetationsindex NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) für eine pixelbasierte Klassifikation verwendet, mit der der Versiegelungsgrad abgeschätzt werden kann. Nur in einigen Fällen war es möglich, den Betriebszustand von Fahrzeugen (in diesem Fall Flugzeugen) festzustellen.

1 Einleitung

In der passiven Fernerkundung werden zwei verschiedene Strahlungsarten ausgenutzt:

Reflektierte Strahlung umfaßt den Wellenlängenbereich vom sichtbaren Licht (ca. 400 nm) bis zum mittleren Infrarot (ca. 2 μm). Hierbei handelt es sich um Sonnenlicht, das von den Objekten auf der Erdoberfläche reflektiert wird. Das wellenlängenabhängige Reflexionsvermögen der Oberfläche beeinflusst die Intensität der zurückgeworfenen Strahlung und läßt somit auf das reflektierende Material schließen.

Emittierte Strahlung: Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts emittiert elektromagnetische Strahlung aufgrund der ungeordneten thermischen Bewegung seiner Atome. Die emittierte Strahlung von Körpern mit Temperaturen um 20° C ist im Bereich des sog. thermischen Infrarot zu finden (ca. 8 bis 14 μm).

Der spektrale Verlauf der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers¹ läßt sich mit dem Planckschen Strahlungsgesetz beschreiben:

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

¹Schwarze Körper absorbieren die gesamte einfallende Strahlung und geben sie durch Emission wieder ab.

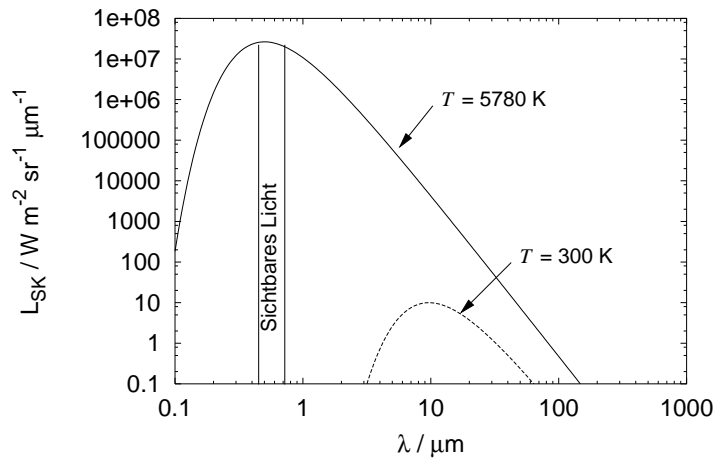


Abbildung 1: Spektrale Strahldichte von schwarzen Körpern verschiedener Oberflächentemperaturen

(mit $c_1 = hc^2$ und $c_2 = hc/k$), wobei L_{SK} die spektrale Strahldichte und T die kinetische Temperatur² des Körpers ist.

In Abbildung 1 ist die Strahldichte doppelt logarithmisch gegen die Wellenlänge aufgetragen. Für eine Temperatur von 6000 K liegt das Maximum genau im Bereich des sichtbaren Lichts. Dies ist auch die Oberflächentemperatur der Sonne. Bei einer Temperatur von 300 K (durchschnittliche Temperatur der Erdoberfläche) liegt das Maximum bei $10 \mu\text{m}$.

Das generelle Problem bei der Messung von Temperaturen aus der Luft ist, daß reale Körper nur einen Teil der Schwarzkörperstrahlung emittieren. Man definiert ein Emissionsvermögen (Emissivität) durch

$$\epsilon(\lambda) = \frac{L(\lambda, T)}{L_{SK}(\lambda, T)}.$$

In der thermalen Fernerkundung sorgt die Nichtberücksichtigung der Emissivität dafür, daß ein Körper kälter aussieht, als er ist. Obwohl die meisten Oberflächen eine Emissivität nahe 1 haben (z. B. Wasser 0.97, Vegetation 0.99, Asphalt 0.96, s. [SHL88] oder [Koh96]) gibt es auch Materialien mit einer Emissivität nahe bei 0 (z. B. poliertes Metall).

Unsere Arbeitsgruppe untersucht städtische Flächen mit Hilfe von multispektralen Luftbildern. Ziel ist die Methodenentwicklung für Klassifikation und Änderungsdetektion. In dieser Arbeit wird das thermische Verhalten von Bodenflächen untersucht und für die Klassifizierung ausgenutzt. Grundlage sind Bildüberfliegungen zu vier verschiedenen Tageszeiten eines Sommertages.

²Meßbar mit einem Thermometer im thermischen Kontakt mit dem Körper.

2 Datennahme

2.1 Luftbilddetektor

Der hier verwendete Detektor ist ein flugzeuggetragener Zeilenscanner (Daedalus AADS 1268), der mit einem rotierenden Spiegel arbeitet. Durch die Zeilenabtastung und die Bewegung des Flugzeugs ergibt sich ein zweidimensionales Bild. Bei einer Flughöhe von 300 m erreicht der Scanner eine Auflösung von 70 cm im Nadir und 1.40 m beim Scanwinkel 43° . Zur Temperaturkalibration befinden sich zwei Referenzstrahler (schwarze Körper mit bekannter Temperatur, z. B. 10°C und 60°C) oberhalb des rotierenden Spiegels, die so bei jeder Umdrehung mit aufgezeichnet werden. Später kann dann linear zwischen den beiden Temperaturen interpoliert werden.

Der Detektor besitzt 10 Kanäle im Spektralbereich 420 nm bis $2.35\ \mu\text{m}$ und einen thermischen Kanal im Bereich 8.5 bis $13\ \mu\text{m}$.

2.2 Überfliegungen und Bodenmessungen

Am 26. August 1997 wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für die Universität Hamburg mehrere Überfliegungen des Nürnberger Flughafens und angrenzender Gebiete durchgeführt. Um 5:30 MESZ wurden aus einer Höhe von 900 m Temperaturbilddaten aufgezeichnet. Bei den weiteren Überfliegungen (9:00 [300 m], 12:30 [900 m] und 13:30 MESZ [300 m]) wurden dann auch Multispektralbilder in den 10 Spektralkanälen aufgenommen. Die gemessenen Strahldichten wurden mit Hilfe des Programmsystems SENSAT 5 [Ric92] in Reflektanzen umgerechnet. Insgesamt stehen so Reflektanzdaten von drei und Temperaturdaten von vier Tageszeiten zur Verfügung. Parallel zu den Überfliegungen wurden von uns mit Hilfe von fünf Thermoelementen Tagestemperaturkurven aufgezeichnet. Die Sensoren mit zugehörigen Datenloggern wurden am Nürnberger Flughafen am Vortag (16:00 MESZ) aufgestellt, und speicherten jede Minute einen Temperaturwert. Bei den Messpunkten handelte es sich um die Oberflächen Asphalt, Beton, Rasen und Kiesdach ($2\times$).

Zusätzlich wurde die Strahlungstemperatur von Bodenflächen aus etwa einem Meter Höhe mit einem handgehaltenen Strahlungstemperaturmeßgerät (Typ Cyclops Compac 3, Firma Minolta/Land) gemessen. Hierbei wurde jeweils über zehn Meßwerte eines Meßpunkts gemittelt, um Inhomogenitäten zu berücksichtigen.

3 Auswertung der Messungen

3.1 Atmosphärenkorrektur

Auch von einer klaren Atmosphäre wird im Bereich von 8 bis $14\ \mu\text{m}$ ca. 20% der Strahlung absorbiert. Hierfür sind die Absorptionsbanden der Luftmoleküle (besonders H_2O) und die Aerosole (Teilchen von 0.01 bis $100\ \mu\text{m}$ 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“ und darauf aufbauend „SENSAT“, mit der der Einfluß der Atmosphäre im Rechner modelliert wird. MODTRAN berechnet die spektrale Transmission, indem die Atmosphäre in konzentrische

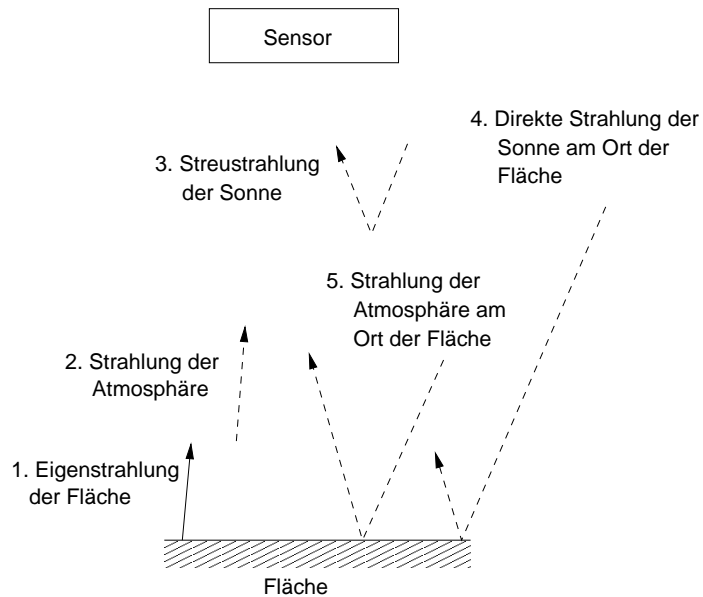


Abbildung 2: Von MODTRAN berechnete Beiträge zur Strahldichte (s. [RB85]).

Kugelschalen zerlegt wird, wobei die wichtigsten Parameter Temperatur, Druck und relative Luftfeuchte sind. Diese höhenabhängigen Daten erhält man am besten aus einem Sondaufstieg. 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 sind die Terme, die zur gemessenen Strahldichte beitragen, eingezeichnet:

1. Die Emission der Fläche stellt den größten Anteil dar.
2. Die Luftschicht zwischen Boden und Sensor emittiert direkt in den Sensor.
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%

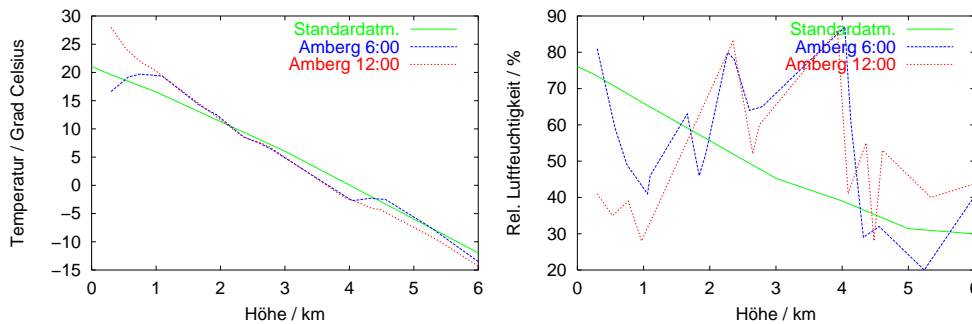


Abbildung 3: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte im Vergleich von SENSAT-Standardatmosphäre “mid-latitude summer” und Radiosondenaufstiegen in Amberg am 26. August 1997.

Da am Tag der Überfliegung kein Radiosondenaufstieg in Nürnberg durchgeführt wurde, wurden Daten aus Amberg (ca. 55 km östlich von Nürnberg) zur Atmosphärenkorrektur verwendet. Abbildung 3 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 im Laufe des Tages großen Schwankungen unterworfen ist.

Die Atmosphärenkorrektur wurde sowohl mit den Radiosondenaufstiegen von Amberg als auch mit der Standardatmosphäre “mid-latitude summer” durchgeführt. Die maximale Abweichung dieser drei Berechnungen betrug 1°C , so daß dieser Wert als Fehler für die vom Daedalus gemessenen Temperaturen angenommen wurde.

3.2 Vergleich von Strahlungs- und kinetischer Temperatur

In den Abbildungen 4 und 5 sind die am Tag der Überfliegung gemessenen Temperaturen zweier Materialien gegen die Zeit aufgetragen. Zur Bestimmung der Scanner-Temperaturen wurden auf den Scanner-Bildern Polygone auf der jeweils interessierenden Fläche definiert und die Temperatur gemittelt.

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 $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Die Fehlerbalken an den Daedalus-Temperaturen sind die Summe aus der Standardabweichung der Pixel, die zur Mittelung benutzt wurden, und 1°C aus der Atmosphärenkorrektur.

Für die Temperaturmessungen mit den Thermoelementen (CControl) wurde der Fehler aufgrund der Angaben über die verwendete Elektronik (Sensor, Vorverstärker, AD-Wandler) auf $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ geschätzt.

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

- Die gemessenen Flächen sind nicht vollkommen homogen bezüglich der Temperaturverteilung. Das Thermoelement mißt an einem festen Punkt, während die

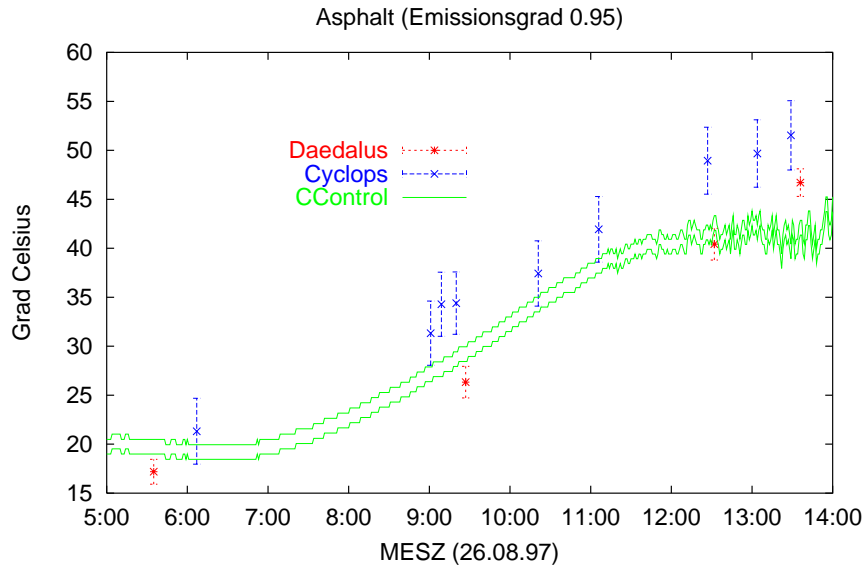


Abbildung 4: Die Temperatur einer Asphaltfläche am Nürnberger Flughafen. Cyclops: vom Strahlungstemperaturmessgerät am Boden gemessene Temperaturen. Daedalus: vom Scanner aus 300 und 900 m Höhe gemessene Temperaturen. CControl: vom Thermoelement gemessene Temperaturen.

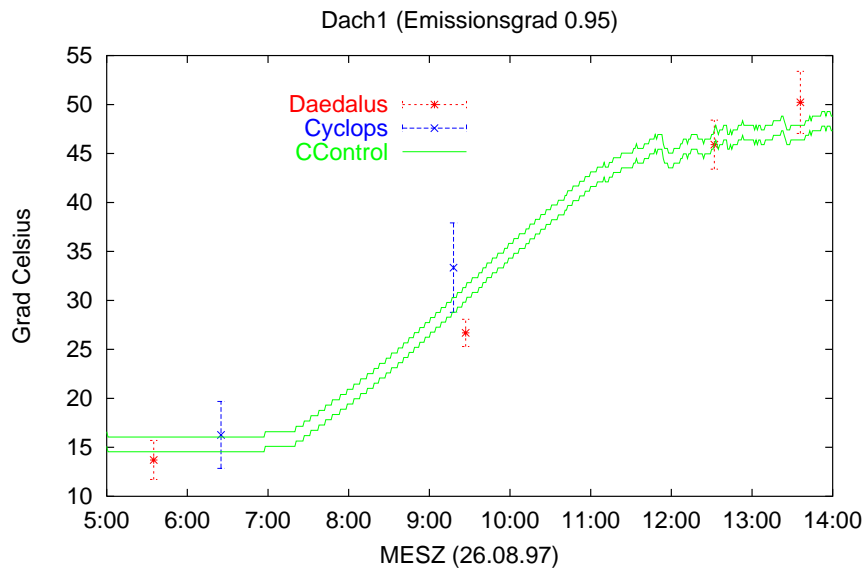


Abbildung 5: Die Temperatur eines Kiesdaches am Nürnberger Flughafen. Bezeichnungen: s. Abb. 4.

vom Scanner gemessene Temperatur über ca. 10 m² gemittelt wird.

- Ab 12:00 Uhr treten Schwankungen in den Signalen der Thermoelemente auf (Abb. 4 und 5). Dies könnte mit beginnender Wolkenbildung erklärt werden.
- Die Lufttemperatur lag mit 27° C (um 12:00 Uhr) deutlich unter der Oberflächentemperatur des Asphalt, 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.³

4 Anwendungen

Im folgenden werden zwei Anwendungen näher untersucht.

4.1 Versiegelung

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

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

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 vor allem folgende charakteristische Merkmale:

Vegetation hat die Fähigkeit, sich durch Evapotranspiration zu kühlen, so daß die Temperatur zum Mittag hin 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 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 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.

³Eine genauere Diskussion der verschiedenen Fehlerquellen findet sich in [Lip95].

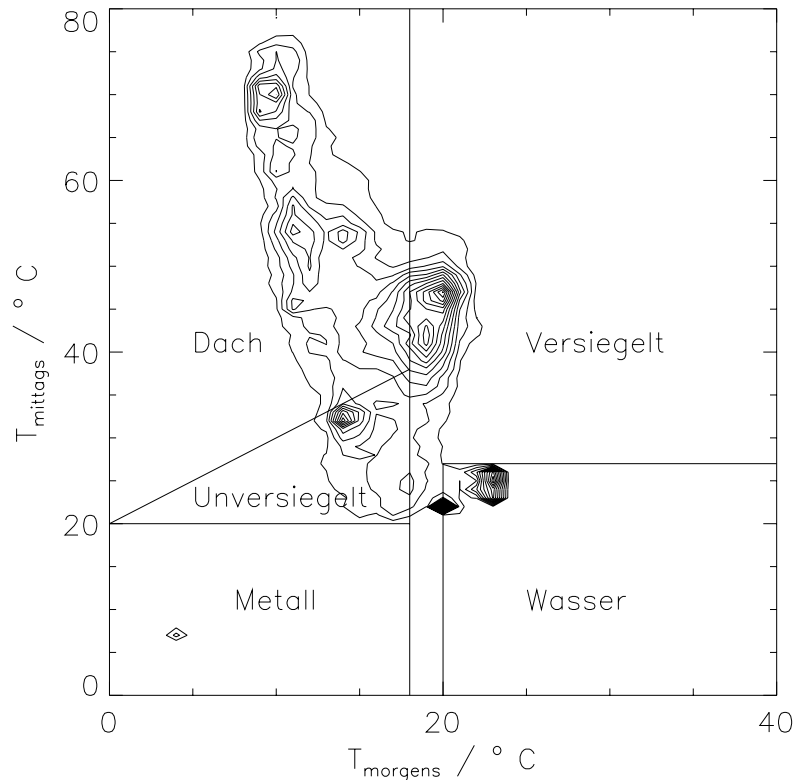


Abbildung 6: Multitemporaler Temperatur-Merkmalraum. Eingezeichnet sind die Schwellwerte, die zur Klassifikation verwendet wurden.

Abbildung 6 zeigt das unterschiedliche thermische Verhalten in einem multitemporalen Temperatur-Merkmalraum. Aufgetragen wurde für alle Bildelemente (Pixel) jeweils die Temperatur am Morgen gegen die Temperatur zur Mittagszeit. Die Höhenlinien zeigen klare Maxima aufgrund unterschiedlicher Oberflächen an.

Im folgenden wurden zur Klassifikation jeweils drei Datensätze verwendet, die Temperatur um 5:53 MESZ (T_{m0}), die Temperatur um 13:21 MESZ (T_{mi}) und der 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. Wir haben 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 6 in folgender Reihenfolge vorgenommen ($\Delta T = T_{mi} - T_{m0}$):

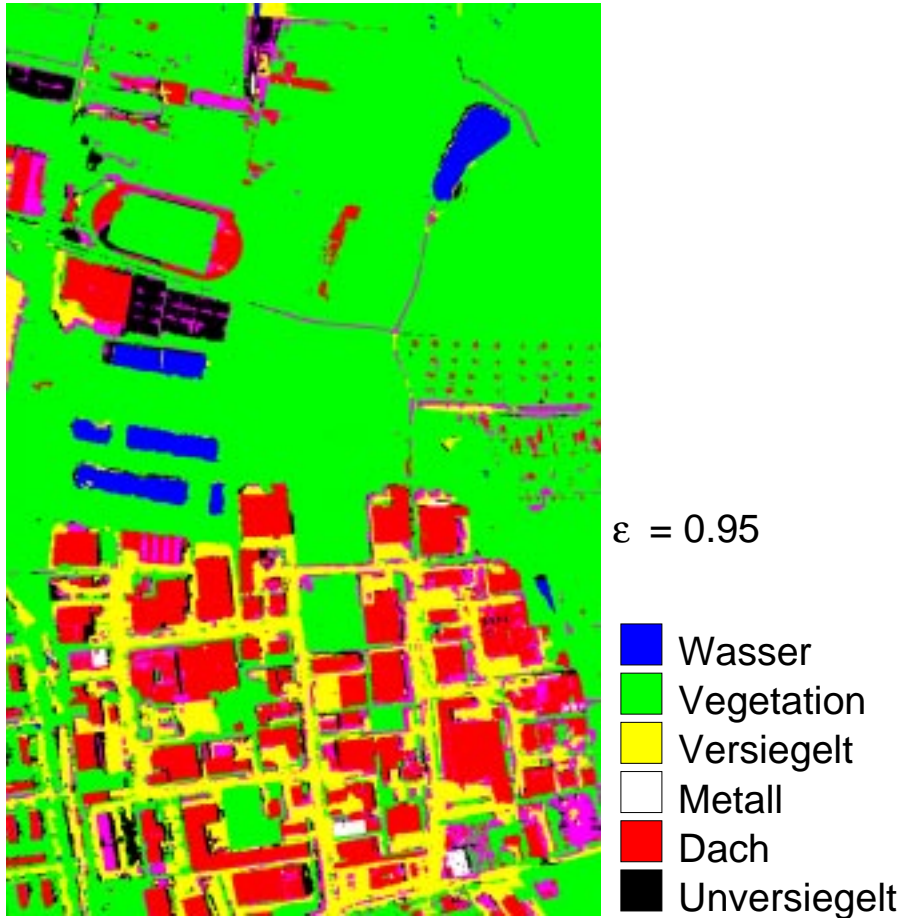


Abbildung 7: Klassifikation mit NDVI und Temperatur.

Eine farbige Darstellung findet sich unter

<http://kogs-www.informatik.uni-hamburg.de/PROJECTS/censis/publications.html>

Wasser	$T_{mo} > 20^\circ$ und $T_{mi} < 27^\circ$
Vegetation	$NDVI > 0.3$
Versiegelter Boden	$T_{mo} > 18^\circ$
Metall	$T_{mi} < 20^\circ$
Dächer	$\Delta T \geq 20^\circ$
Unversiegelte Freifläche	$\Delta T < 20^\circ$

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

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis einer Klassifikation nach obigem Schema. Wasserflächen lassen sich auf diese Weise 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 (Erde) sich sehr stark

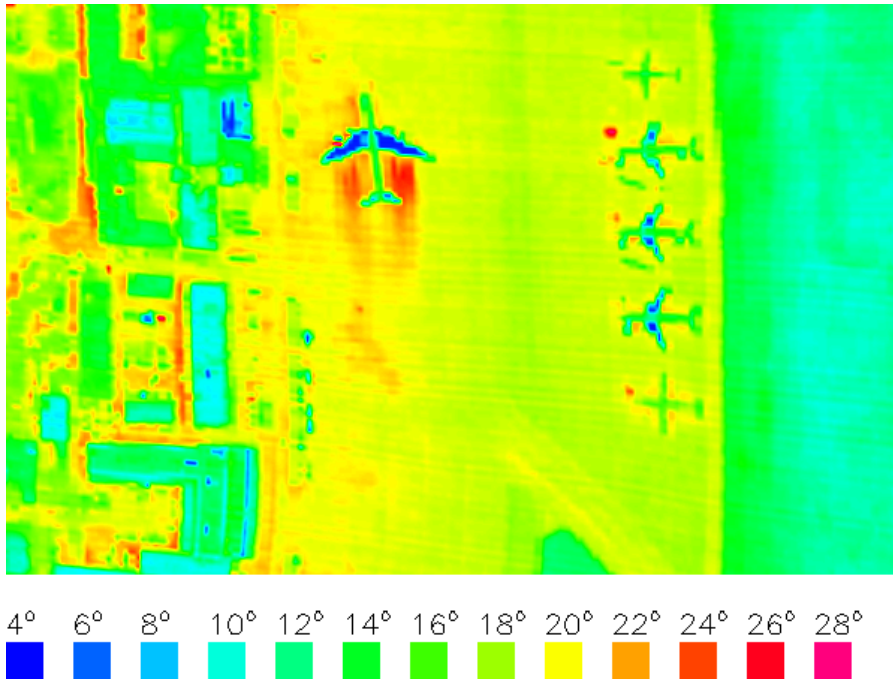


Abbildung 8: Thermalaufnahmen des Nürnberger Flughafens aus 900 m Höhe (26. 8. 97, ca. 6 Uhr MESZ). Emissivität $\epsilon = 0.95$.

aufheizen und so fälschlicherweise als Dach klassifiziert werden.

4.2 Betriebszustände von Flugzeugen

In Abbildung 8 ist ein Ausschnitt der morgendlichen Überfliegung (ca. 6 Uhr MESZ, 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. 8 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 Auflösung von 2.10 m bis 4.20 m bei einer Flughöhe von 900 m nicht aus. Bei den Mittagmessungen, 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 Emissi-

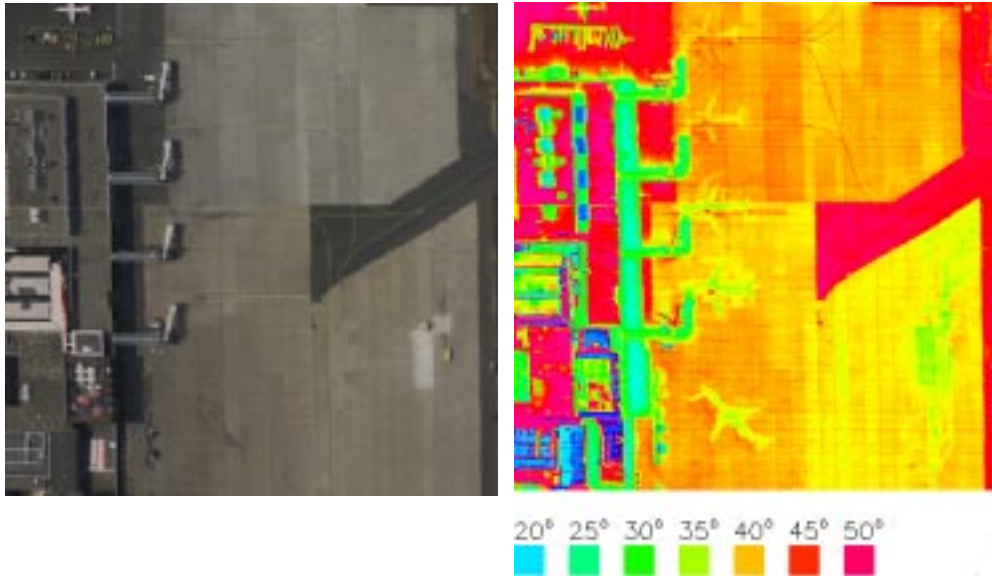


Abbildung 9: Daedalus-Aufnahmen des Nürnberger Flughafens, Höhe 300 m, 26. 8. 1997, 13:30 MESZ. Links: Reflektanzbild (RGB), rechts: Thermalbild. Emissivität $\epsilon = 0.95$.

vität 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 (vgl. Abb. 9), da sich der Boden unter dem Fahrzeug nicht so stark aufheizt wie die Umgebung.

5 Zusammenfassung

Die hier beobachtete Übereinstimmung von mit Thermoelementen gemessenen kinetischen Temperaturen und den atmosphärenkorrigierten Strahlungstemperaturen ist im Rahmen der Fehler von $2^\circ - 3^\circ \text{C}$ recht gut. 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.

Es hat sich gezeigt, daß der Thermalkanal des DAEDALUS die Reflektanzkanäle in sinnvoller Weise ergänzen kann. Insbesondere kann Wasser gut detektiert werden, und es ist eine gute Unterscheidung zwischen Dächern und Straßen möglich. Durch Hinzunahme eines Thermalkanals können daher Untersuchungen zum Versiegelungsgrad von Gebieten unterstützt und verbessert werden.

Bei einer Flughöhe von 900 m können nur große Objekte hinsichtlich ihrer Be-

triebszustände untersucht werden. Für Fahrzeuge reicht die Auflösung von 2.10 m bis 4.20 m nicht aus.

Danksagung

Die Bilddaten stammen aus Überfliegungen durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen (DLR); wir danken insbesondere V. Amann. Teile dieser Arbeit wurden gefördert von der Volkswagen-Stiftung.

Literatur

- [Koh96] Friedrich Kohlrausch. *Praktische Physik*. B.G. Teubner, Stuttgart, 1996.
- [Lip95] Kerstin Lippert. *Bestimmung von Landoberflächentemperaturen aus Flugzeug- und Satellitendaten*. Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, 1995.
- [NM97] Maik Netzband und Gotthard Meinel. *Aspekte städtischer Versiegelungserhebung einschließlich GIS-technischer Weiterverarbeitung*. Regensburger Geographische Schriften, Institut für Geographie an der Universität Regensburg, 1997.
- [RB85] Rudolf Richter und Kurt Beier. *Vergleich von Messung und Modellrechnung der Strahlungstemperatur am Beispiel der Thermalkartierung München*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Forschungsbericht, 1985.
- [Ric92] Rudolf Richter. *Radiometrische Auslegung von Sensoren und quantitative Auswertung von Fernerkundungsdaten im optischen Spektralbereich*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Forschungsbericht, 1992.
- [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*.
- [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.