

Thermalbilder und Oberflächentemperaturen

Hermann Goßmann

Inhaltsverzeichnis:

1. Die Bedeutung räumlicher und zeitlicher Temperaturunterschiede	23
2. Die Aufnahmen von Thermalbildern	23
2.1 Aufnahmeverfahren	23
2.2 Aufnahmeplattformen	25
3. Probleme der Thermalbildauswertung	26
3.1 Einfluß der Emissivität der Oberflächen	26
3.2 Einfluß der Atmosphäre	26
3.3 Beobachtungswinkel und relevante Oberflächen	27
4. Probleme der Thermalbildauswertung	29
5. Anwendungsbeispiele	32
5.1 Kaltluftseen, Kaltluftabflüsse, Oberflächentemperaturen der Wälder	32
5.2 Städtische Wärmeinsel, Nachbarschaftseffekte in Ballungsräumen	34
5.3 Synthetische Karten der Wärmebelastung	34
6. Diskussion	36
7. Zusammenfassung	37
Summary	38
8. Literatur	38

1. Die Bedeutung räumlicher und zeitlicher Temperaturunterschiede

Temperaturen und räumliche Temperaturgradienten gehören zu den wichtigsten Steuergrößen aller physikalischen und chemischen und damit auch aller physiologischen Prozesse. Deshalb kann keine ökosystemare Betrachtung auf die Erfassung und Bewertung von Temperaturen verzichten.

Wesentlich sind dabei in aller Regel für den aktuellen Prozeß nicht langzeitige oder großräumige Mittel, sondern Werte an bestimmten Stellen und bestimmten Zeitpunkten. Wesentlich sind zudem in aller Regel nicht die Lufttemperaturen, sondern die Werte in den betreffenden Körpern, Pflanzenteilen etc.

Diese Sätze könnten ein Extrakt aus R. GEIGERs Buch vom „Klima der bodennahen Luftschicht“ sein, sind also klassisches Gedankengut der Geländeklimatologie. Dennoch geraten sie gelegentlich in Vergessenheit und verdienen immer wieder neu hervorgehoben zu werden. Dazu drei Beispiele:

a) F. LAUSCHER (1953) und mit ihm R. GEIGER (1960) berichten von der Bedeutung der unterschiedlichen Erwärmung der Baumstämme und des Bodens an Waldrändern für das Massenaufreten des Forstschädlings *ocneria monacha*, der sogenannten Nonne, in Österreich. Ist der Frühling durch viele sonnenscheinreiche Tage ausgezeichnet, so schlüpfen in den kritischen Tagen an den Waldrändern die Nonnenraupen aus den Eigelegten an den warmen Stämmen, bevor die Parasiten, ihre natürlichen Gegner, aus dem Boden kommen. Der unterschiedliche Temperaturgang in den Baumstämmen und im Waldboden führte nachweislich 1946 zu einer Nonnenkatastrophe.

b) Seitdem ich in St. Peter im Schwarzwald in 750 m Höhe wohne, weiß ich, daß es möglich ist, daß an einem klaren Spätherbsttag gleichzeitig die Johannisbeeren auf der Südseite des Hauses ihre Knospen weiter vergrößern, während 15 m entfernt im Schat-

ten einer Wand 4 cm hohes Kammeis den ganzen Tag über stehen bleibt.

c) Untersuchungen der Oberflächentemperaturen wie die in Abb. 1 vorgestellten Meßreihen am Schauinsland bei Freiburg zeigen, daß unmittelbar benachbarte Flächen am Tage Temperaturdifferenzen von über 40 K, in der Nacht noch von mehr als 10 K ausbilden können.

Landschaftsökologische Arbeiten müssen diese große räumliche und zeitliche Differenzierung der Luft-, Bestands- und Bodentemperaturen in Rechnung stellen. Eine wesentliche Voraussetzung der weiteren Entwicklung der Ökosystemforschung wird deshalb die bessere Erfassung der dreidimensionalen Temperaturfelder und ihrer zeitlichen Verläufe sein. Die Frage ist, welchen Stellenwert in diesem Zusammenhang die flächenhafte Erfassung der Oberflächentemperaturen mit radio-metrischen Meßsystemen hat.

2. Die Aufnahmen von Thermalbildern

2.1 Aufnahmeverfahren

Über die Fernmessung der Oberflächentemperaturen liegen aus den siebziger Jahren ausführliche Texte vor (D. LORENZ 1973, H. GOSSMANN 1977). Grundlage ist die Messung elektromagnetischer Strahlung in Wellenlängenbereichen, in denen die Landoberflächen temperaturabhängig strahlen und in denen gleichzeitig die Atmosphäre durchlässig ist (Strahlungsfenster). Dies ist vor allem der Bereich des großen Wasserdampffenster bei 10 µm (Abb. 2). Die flächenhafte Erfassung zu Thermalbildern erfolgt mit sogenannten optisch-mechanischen Abtastern. Bei diesen (Abb. 3) wird die Aufnahme der einzelnen Bildzeile durch einen rotierenden Spiegel, der Zeilenvorschub durch die Bewegung der Trägerplattform erzeugt. Optisch-elektronische Abtastsysteme für die Thermalbild-

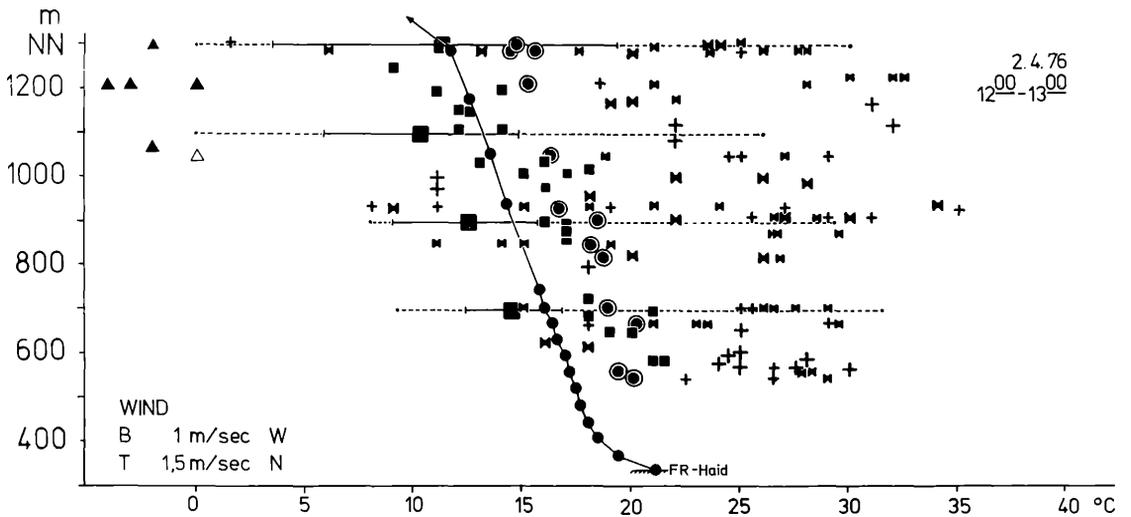
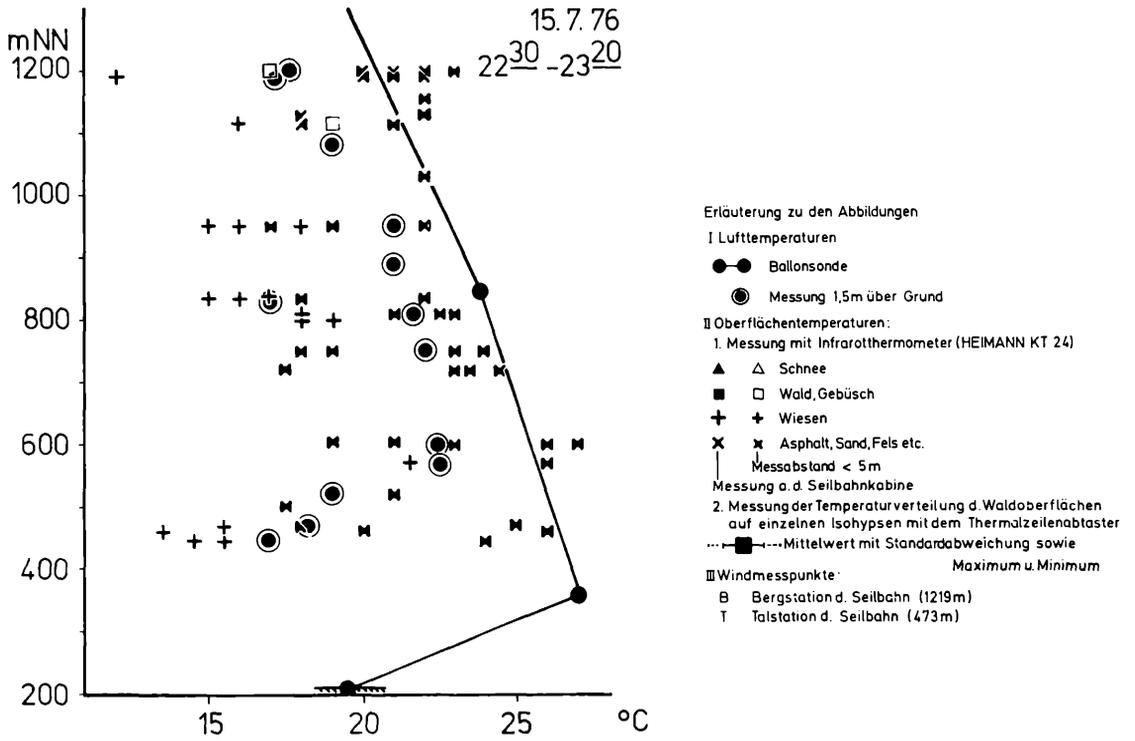


Abbildung 1

Vergleich von Lufttemperaturen und Strahlungstemperaturen der Landoberfläche bei Strahlungswetterlagen.

Aufnahmen am Anstieg des Schwarzwaldes aus der Oberrheinebene am Schauinsland bei Freiburg während der Kampagne des Deutschen Flugzeugmeßprogrammes 1976.

Comparison of air temperatures and the land surface's radiation temperatures during clear weather conditions.

Records taken at the west-facing slopes of Mt. Schauinsland near Freiburg during the campaigns of the "Deutsches Flugzeugmeßprogramm" 1976.

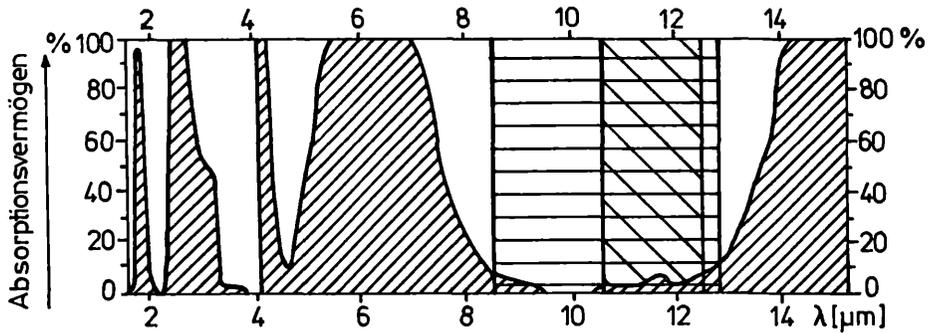


Abbildung 2

Absorptionsvermögen der Atmosphäre für elektromagnetische Strahlung zwischen 2 µm und 15 µm (nach D. LORENZ 1973).

Zugrunde gelegt ist eine 300 m mächtige Luftschicht in Nähe der Erdoberfläche mit einem Wasserdampfgehalt von 9 g je m³. Die Kurve zeigt die Strahlungsfenster in den Spektralbereichen 2,0 bis 2,5 µm, 3,4–4,2 µm, 4,5–5,1 µm und 8–13 µm.

Schraffierte Bereiche: Aufnahmeintervalle häufig verwendeter Thermalabtaster.

Absorption coefficients for electromagnetic radiation between 2 µm and 15 µm of a 300 m air layer close to the land surface with a water vapour content of 9 g/m³ (D. LORENZ 1973). The curve reveals radiation windows in the spectral ranges 2,0–2,5 µm, 3,4–4,2 µm, 4,5–5,1 µm and 8–13 µm.

Hatched spectral bands: channels of frequently used thermal-scanners.

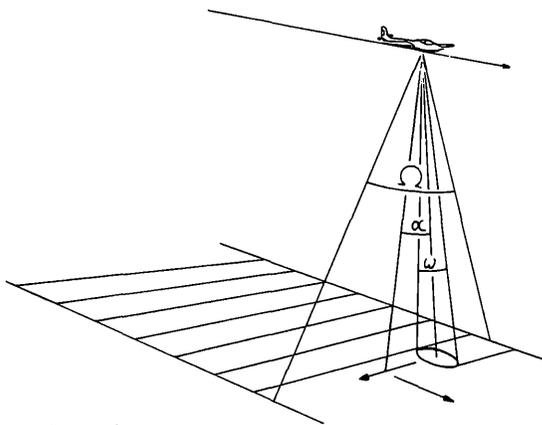


Abbildung 3

Prinzip des Zeilenabtasters.

Bei optisch-mechanischen Abtastern wird die Aufnahme der Bildzeilen durch die Rotation eines Spiegels oder Prisma, der Zeilenvorschub durch die Bewegung der Trägerplattform erzeugt. In der Aufnahmegeometrie sind 3 Kenngrößen wesentlich.

Beobachtungswinkel α : Der Winkel zwischen den Strahlen zum Nadir und zur Mitte des jeweils aufgenommenen Oberflächenelementes.

Abtastfeld Ω : Winkel quer zur Flugrichtung, unter dem die vom Abtaster aufgenommene Fläche von der Flugbahn aus erscheint. Das Zweifache des maximalen Beobachtungswinkels.

Öffnungswinkel ω : Ebene Winkelgröße zur Kennzeichnung des Raumwinkels, aus dem der Sensor zu einem bestimmten Zeitpunkt Strahlung empfängt. Er bestimmt zusammen mit der Flughöhe und dem Beobachtungswinkel α die Größe des abgetasteten Elementes, d. h. die geometrische Auflösung der Aufnahme.

Principle of the line-scanner. Opto-mechanical scanners use an oscillating or rotating mirror to scan at right angles to the space- or aircraft flight direction.

The following three factors are of special importance for the properties of the resulting image: α : view angle, Ω : field of view; ω : instantaneous field of view.

aufnahme gibt es noch nicht, werden aber zur Zeit entwickelt und wohl in einigen Jahren verfügbar sein.

Die am Sensor ankommende Strahlung gilt als Maß für die Temperatur der emittierenden Schicht, die bei festen Körpern und Flüssigkeiten in der Regel

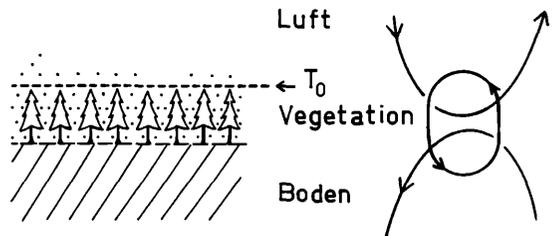


Abbildung 4

Die Oberflächentemperatur als Grenzflächeneigenschaft im System der vertikalen Energieflüsse eines Vegetationsbestandes.

Die Thermalaufnahmen liefern die zweidimensionale Verteilung einer Zustandsgröße im dreidimensionalen System der Energie- und Massenflüsse.

The surface temperature as a parameter in the system of vertical energy fluxes of a plant canopy. The thermal images represent a two-dimensional distribution of a controlling factor in a three-dimensional system of energy and mass fluxes.

wenige Mikrometer beträgt (Hauttemperatur, Oberflächentemperatur). Damit erfährt das Thermalbild aus einem dreidimensionalen Prozeßgefüge die zweidimensionale Verteilung einer Zustandsgröße an einer markanten Grenzfläche (Abb. 4). Der entscheidende Vorteil der Thermalbilder gegenüber fast allen klimatologischen und ökologischen Meßverfahren ist also die flächenhafte Information. Das zweidimensionale Muster muß hier nicht aus Einzelmessungen inter- und extrapoliert werden.

2.2 Aufnahmeplattformen

Als Aufnahmeplattformen für Thermalzeilenabtaster werden Flugzeuge und Satelliten eingesetzt. Für die zivile Anwendung verfügbare Zeilenabtaster wie der Bendix M²S-Scanner liefern bei einer Flughöhe von 1000 m eine Geländeauflösung von 2,5 m, bei 4000 m entsprechend 10 m (Abb. 3). Für die zivile Forschung verfügbare Thermalbilder von verschiedenen Satelliten haben eine Bildelementgröße im Nadir von 1 km (NOAA-AVHRR), 500 m (HCMM) und 120 m (Landsat-TM). Wie bei

Satellit	METEOSAT	NOAA-6,7,8,9	HCMM	LANDSAT-5
Sensor	Radiometer	AVHRR	HCMR	Thematic Mapper (TM)
Kanal	IR: 10,5-12,5 μm	Kan.4: 10,3-11,3 μm	IR: 10,5-12,5 μm	Kan.6: 10,4-12,5 μm
Räumliche Auflösung im Subsatellitenpunkt	5 km	1,1 km	0,6 km	120 m
Breite des Aufnahme-streifens	"full disc"	3000 km	718 km	185 km
Aufnahmezeiten (bezogen auf den Tagesgang der Oberflächentemperatur)				
Repetitionsrate	30 Min.	täglich	5-7 Tage	16 Tage

Abbildung 5

Aufnahmeparameter wichtiger satellitengetragener Thermalabtaster (Größe eines Bildelementes im Nadir, Aufnahmezeitpunkte bezogen auf den Tagesgang der Oberflächentemperaturen, Repetitionsrate).

Characteristics of important space-borne thermal scanners. Subsatellite pixel size, passage time related to the daily temperature cycle, repetition rate.

allen Fernerkundungssystemen muß man jeweils auf Kostengründen zwischen großer Flächenüberdeckung, hoher Wiederholungsrate aber schlechter räumlicher Auflösung oder einer besseren räumlichen Auflösung aber weniger Aufnahmetermen wählen (Abb. 5).

3. Probleme der Thermalbildauswertung

Um keine überzogenen Erwartungen und kein leichtfertiges Engagement für die Thermalbildauswertung zu wecken, muß man zunächst die Probleme der radiometrischen Oberflächentemperaturmessung ansprechen.

3.1 Einfluß der Emissivität der Oberflächen

Der Schluß von der gemessenen Strahlung auf die Temperatur der strahlenden Oberfläche setzt die Gültigkeit des Planck'schen Strahlungsgesetzes, also einen sogenannten schwarzen Strahler voraus (vgl. Abb. 6). Alle natürlichen Oberflächen weichen von dieser Bedingung ab, haben also in den betrachteten Spektralbereichen einen Emissionskoeffizienten kleiner als 1 (vgl. Tab. 1). Dabei entspricht eine Verschiebung des Emissionskoeffizienten um 1% nach unten einer Abnahme des resultierenden Meßwertes von 0,2-0,6 K je nach der Aufnahmesituation (vgl. Abb. 7). Wir nennen die unter der Annahme eines schwarzen Strahlers bestimmten Temperaturwerte „Strahlungstemperaturen“, „Strahlungsäquivalenttemperaturen“, „Effektivtemperaturen“, „scheinbare Temperaturen“ oder ähnlich (engl.: apparent temperatures, radiation temperature etc.). Die Strahlungstemperaturen sind immer kleiner als die realen Oberflächentemperaturen. Die Effekte und die durch sie bedingten Inhomogenitäten in Thermalbildern können mehrere Grad betragen, insbesondere, wenn vegetationsbedeckte und andere Oberflächen in einem Bildausschnitt auftreten. Blanke Metalloberflächen haben eine Sonderstellung. Sie erscheinen wegen ihres geringen Emissionsvermögens in Thermalbildern immer als extrem kalt.

3.2 Einfluß der Atmosphäre

Thermalaufnahmen erfolgen in Spektralbereichen, in denen die wolkenfreie Atmosphäre durchlässig ist, den sogenannten Strahlungsfenstern, zum Beispiel dem großen Wasserdampffenster zwischen 8 und 13 μm (vgl. Abb. 2). Auch dort kommt es durch Wasserdampf, CO_2 , Ozon und andere Spurengase zu einer gewissen Absorption und gleichzeitig zu einer Eigenemission der Atmosphäre (vgl. Abb. 8). Diese Absorption und Emission der Luft werden bestimmt durch die Absorptions- und die Emissionskoeffizienten der relevanten Gase. Nach dem Gesetz von Kirchhoff sind die Absorptions- und die Emissionskoeffizienten für jede einzelne Wellenlänge gleich. Bei der Absorption ist dieser Koeffizient anzuwenden (Abb. 9) auf das von unten kommende Strahlungsangebot, bei der Emission auf die der Lufttemperatur entsprechende Schwarzkörperstrahlung. Ist die Luft wärmer als die Landoberfläche, so wird die Strahlendichte durch den Einfluß der Atmosphäre erhöht. Ist die Luft kälter als die Landoberfläche, wird die Strahlendichte reduziert. Dies hat mehrere Konsequenzen:

- Der Meßwert am Sensor ist gegenüber der Strahlungstemperatur der betrachteten Oberfläche in Richtung auf die Lufttemperatur verschoben. An einem wolkenfreien Tag mit hohen Oberflächentemperaturen werden diese also in der Regel reduziert. In einer wolkenfreien Nacht können sich daraus Verschiebungen in beide Richtungen ergeben.

Die Differenzen zwischen den Temperaturen verschiedener Oberflächen werden durch diesen Effekt verkleinert wiedergegeben. Die realen Temperaturdifferenzen benachbarter Flächen sind größer, als die unkorrigierte Thermalaufnahme angibt.

Man kann diese Effekte anhand eines Temperatur-Feuchte-Profiles der Luft berechnen. Dabei ergibt sich unter anderem, daß in Abhängigkeit von der Höhenlage der betreffenden Landoberfläche Unterschiede im Korrekturwert von mehr als 1 Grad auftreten. Dabei spielen insbesondere die untersten 100 m mit der ja etwas wärmeren, wasserdampfreicher Luft eine ganz erhebliche Rolle.

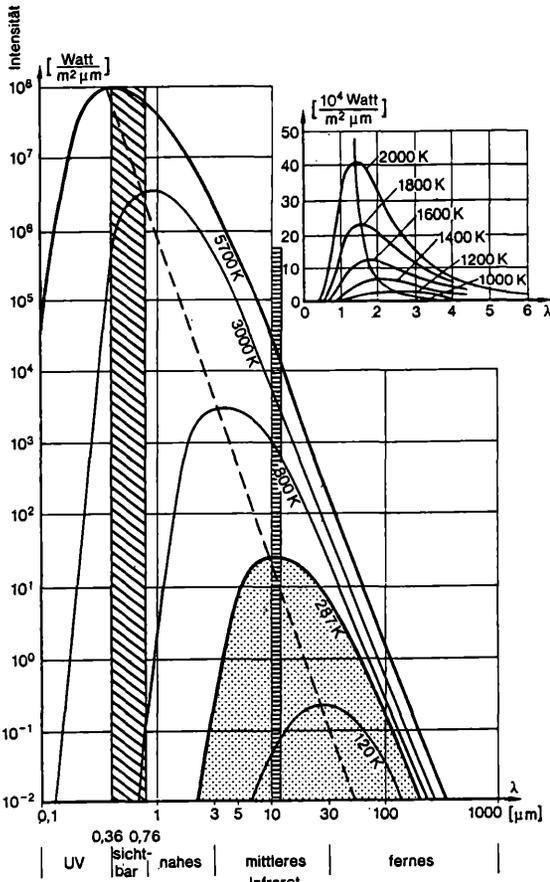


Abbildung 6

Spektrale Verteilung der Schwarzkörperstrahlung bei verschiedenen Oberflächentemperaturen nach dem Planckschen Strahlungsgesetz in einem logarithmischen und in einem kartesischen Koordinatensystem.

Die gerasterte Fläche beschreibt die Schwarzkörperemission bei 287 K (= 14°C). Die Verlagerung der Wellenlänge des Intensitätsmaximums (λ_{max}) nach links mit wachsender Temperatur entspricht dem Wienschen Verschiebungsgesetz ($\lambda_{max} \cdot T = 2880 \mu\text{m} \cdot \text{K}$).

Die Zunahme der Flächen unter den Kurven im äquidistanten Koordinatensystem (Gesamtausstrahlung) folgt dem Gesetz von Stefan-Boltzmann ($E = \delta \cdot T^4$ mit $\delta = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$).

Die waagrecht schraffierte Säule markiert das Aufnahmeintervall wichtiger satellitengestützter Thermalabtaster.

The spectrum of black body radiation at different surface temperatures (Planck's law). The spectral distribution is shown in a logarithmic and a cartesian coordinate system. The rastered area describes the total black body emission at 287 K (= 14°C).

According to Wien's displacement law the wavelength of the highest intensity shifts to the left when temperature increases ($\lambda_{max} \cdot T = 2880 \mu\text{m} \cdot \text{K}$).

The areas under the curves in the aequidistant coordinate system (total emission) follow the Stefan-Boltzmann law ($E = \delta \cdot T^4$).

The hatched column marks the channel of important spaceborne thermal scanners.

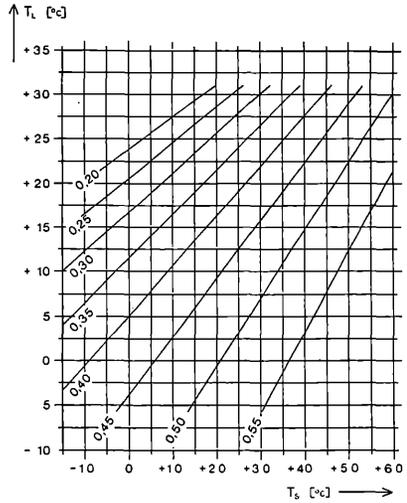


Abbildung 7

Diagramm zur Schätzung des Einflusses des Emissionsvermögens auf die radiometrische Messung der Oberflächentemperaturen im Spektralbereich 8 - 14 μm unter Berücksichtigung der an der Oberfläche reflektierten atmosphärischen Gegenstrahlung.

T_s = gemessene Strahlungstemperatur

T_L = Lufttemperatur

Isolinien: Differenz $T - T_s$ von wahrer Oberflächentemperatur und Strahlungstemperatur bei dem Emissionsvermögen $\epsilon = 0,99$.

Quelle: D. LORENZ 1973

The estimation of the influence of the emissivity on radiometric measurements of surface temperatures in the spectral band from 8 to 14 μm with consideration to atmospheric counter radiation reflected from the surface.

T_s = measured radiation temperature

T_L = air temperature

Isolines: difference $T - T_s$ between true surface temperature at $\epsilon = 0,99$.

(D. LORENZ 19073)

Die Korrektur des Einflusses der Atmosphäre in einer Thermalszene mit reliefiertem Gelände setzt also die Kenntnis des Zustandes der Atmosphäre (zum Beispiel aus einem Radiosonden-Profil) und die Kombination der Thermalaufnahme mit einem digitalen Geländemodell voraus. Über Wasser oder Wolken gibt es inwischen Korrekturen des Einflusses der Atmosphäre auf der Basis der Aufnahme zweier oder mehrerer Spektralbereiche mit sogenannten Split-Window-Algorithmen.

Beide Effekte (Einfluß der Emissionskoeffizienten und Einfluß der Atmosphäre) müssen beachtet werden, wenn die Meßwerte quantitativ als Temperaturwerte benutzt werden sollen, aber auch, wenn „nur“ die relativen Temperaturunterschiede verschiedener Oberflächentypen (z. B. verschiedener Landnutzungsklassen) oder verschiedene hoch liegender Oberflächen betrachtet werden.

3.3 Beobachtungswinkel und relevante Oberflächen

Jede Landoberfläche setzt sich aus unterschiedlichen Oberflächenelementen mit verschiedener Temperatur zusammen. Je nach ihrer Beteiligung an der gemessenen Strahlung bekommt man verschiedene Temperaturmeßwerte. Dies ist einerseits bei der Auswertung von Mitteltemperaturen größerer Einheiten zu beachten. Es führt aber auch

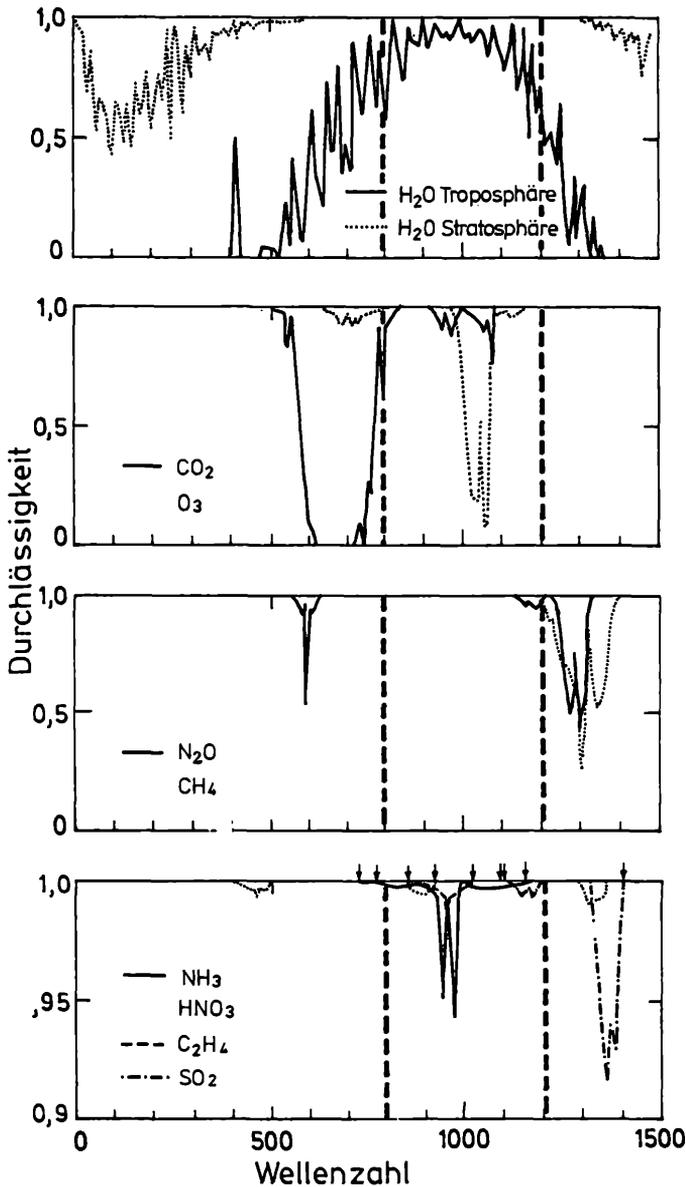


Abbildung 8

Absorption verschiedener atmosphärischer Gase in ihrer derzeitigen Konzentration im Bereich des großen Wasserdampf Fensters. Das Fenster wird durch eine starke CO₂-Bande an der langwelligen Seite eingengt und durch eine O₃-Bande zwischen 9 und 10 µm in zwei Teilfenster gegliedert. Wegen der Ozonbande werden Satellitenthermalbilder meist im Spektralbereich zwischen 11,5 und 12,5 µm aufgenommen. Bei Flugzeugaufnahmen wird dagegen das gesamte Fenster zwischen 8 und 13 µm genutzt. *Absorption spectra of different atmospheric gases in their recent concentration in the realm of the big water vapour window. The window is narrowed and divided into two parts by a strong CO₂-band on the longwave side and an O₃-band between 9 and 10 µm. Because of the ozone-band, satellite thermal images are mostly taken in the spectral range between 11,5 and 12,5 µm. For air-borne mapping, however, the whole window between 8 and 13 µm is used.*

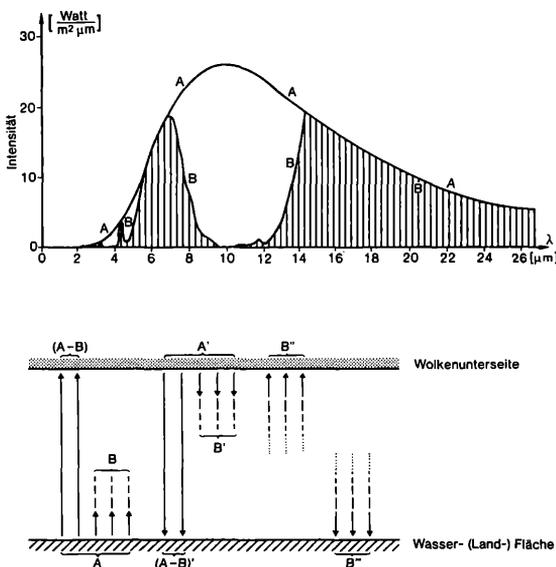


Abbildung 9

oben: Schwarzkörperemission (Kurve A) und reale Emission einer 300 m mächtigen Luftschicht mit 9 g Wasserdampf je m³ (Kurve B) bei 14°C, unten: Langwellige (terrestrische) Strahlungsströme zwischen einer Land- (bzw. Wasser-) Oberfläche, einer Wolkenunterseite und der von beiden eingeschlossenen Luftschicht. *a) Black Body Radiation (curve A) and real emission of a 300 m thick air layer with a water vapour content of 9 g/m³ (curve B) at 14°C. b) Longwave (terrestrial) radiation fluxes between a land (water) surface, an underside of a cloud and the air layer in between.*

Tabelle 1

Emissionskoeffizienten verschiedener Oberflächenarten in Spektralbereichen zwischen 8 und 14 μm .

(Zusammengestellt von A. BAUMGARTNER u. a. 1985)

Emissivities of different surface types in the spectral band from 8 to 14 μm . (compiled by A. BAUMGARTNER u. a. 1985)

Oberflächenart	ϵ	Oberflächenart	ϵ
Wasser, rein, 1 °C	0.998	Quarz	0.712
Wasser, rein	0.993	Granit	0.815
Wasser, mit einer dünnen Schicht aus Petroleumöl bedeckt	0.972	Granit, rauhe Seite	0.898
Wasser, mit dünnem Polyäthylen bedeckt	0.961	Feldspat	0.870
Schnee, frisch gefallen	0.986	Basalt	0.904
Schnee, trocken, -2,5 °C	0.996	Basalt, rauhe Seite	0.934
Schnee, verschmutzt	0.969	Dolomit, polierte Seite	0.929
Schnee, naß, 0 °C	0.997	Dolomit, rauhe Seite	0.958
Eis	0.980	Quarzsand, grobkörnig	0.914
Sand, fein, trocken	0.949	Siliziumglasplatte	0.865
Sand, fein, naß	0.962	Glas	0.90
Lehm, sandig, trocken	0.954	Menschliche Haut	0.980
Lehm, sandig, naß	0.968	Beton, trocken	0.966
Torf, trocken	0.970	Zement, weiß	0.90
Torf, naß	0.983	Asphaltbelag	0.956
Gras, grün, dichte Strukt.	0.986	Ziegelsteine, rot	0.90
Gras, grün, dünne Strukt. auf feuchtem sandigen Lehm	0.975	Marmor, weiß	0.95
Nadeln von Bäumen	0.971	Schiefer, dunkel	0.90
Nadelwald	0.97	Dachziegel, roter Ton	0.90
Laubwald	0.95	Papier, weiß	0.90
Eichenholz	0.900	Gummi, hart	0.94
Sperrholzplatte	0.962	Aluminiumfolie	0.05
		Stahl, galvanisiert	0.25
		Messing, poliert	0.10
		Eisen, poliert	0.30

wegen der verschiedenen Beobachtungswinkel innerhalb einzelner Aufnahmen zu Inhomogenitäten. So kann bei einem Baumbestand in der Nacht (vgl. Abb. 10 a) bei Punkten im Nadir die Sicht bis zum Boden reichen und dort relativ warme Oberflächenelemente erfassen, während sie bei der Schrägaufsicht am Rand des Bildstreifens nur Information von den relativ kalten Baumwipfeln enthält. In einer Meßreihe, die A. KESSLER (1976, persönl. Mitt.) an der Wärmehaushaltsstation des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg in Hartheim mit Handradiometern ausführte, blieben solche Effekte allerdings unter 1 K. Sehr erheblich ist dies am Tage (Abb. 10 b). Bei entsprechender Aufnahmeconfiguration können auf einer Seite des Bildstreifens vorwiegend besonnte Pflanzenteile, auf der anderen bevorzugt beschattete Pflanzenteile erfaßt sein. D. LORENZ und A. BAUMGARTNER (1970) haben für einen solchen Fall in einem homogenen Fichtenbestand Meßwertunterschiede bis zu 4 K nachgewiesen.

Wir haben also, wenn wir nicht einzelne Blätter, sondern ganze Bestände nehmen, durchaus mit einer erheblichen Anisotropie (Richtungsabhängigkeit) der thermischen Emission zu rechnen.

Unter dem Stichpunkt „relevante Oberflächen“ verbirgt sich aber noch ein ganz anderer Problemkreis. Es ergeben sich nämlich ganz verschiedene Bezugsflächen, je nachdem ob man die vom System

gemessene thermische Strahlung, die in den oberen Halbraum gehende gesamte thermische Strahlung oder gar andere Wärmeflüsse, wie den fühlbaren und latenten Wärmestrom zwischen Bestand und Luft betrachtet. Daß sich für das gerichtete, in die Messung eingehende Strahlungsbündel und die Gesamtausstrahlung in den Halbraum verschiedene Bezugsflächen ergeben, zeigten ja bereits die Abbildungen 10 a und 10 b. Bei beiden aber ist die relevante Oberfläche immer ungefähr gleich der Projektion der erfaßten Oberflächenelemente auf eine horizontale Ebene. Im Bezug auf den Strahlungshaushalt wird ein Ausschnitt der Erdoberfläche durch mehr Struktur nur schwärzer aber nicht größer. Ganz anders ist dies beim fühlbaren und latenten Wärmestrom. Hier ist die Austauschfläche (Abb. 11) z. B. bei Wald um ein Vielfaches größer als bei Wiesen. Es ist die gesamte an den turbulenten Flüssen beteiligte Blattoberfläche. Diese variiert außerdem sehr stark mit den Wetterbedingungen und mit der Reliefform am Standort. Ich komme in Abschnitt 6.1 darauf zurück.

4. Probleme der Thermalbildauswertung

Mit dem letzten Punkt sind wir schon von den Problemen der Aufnahme der Oberflächentemperaturen zu denen der Auswertung von Thermalbildern übergegangen. Man könnte sich dies einfach machen, wenn es bereits rechnerische Modelle des

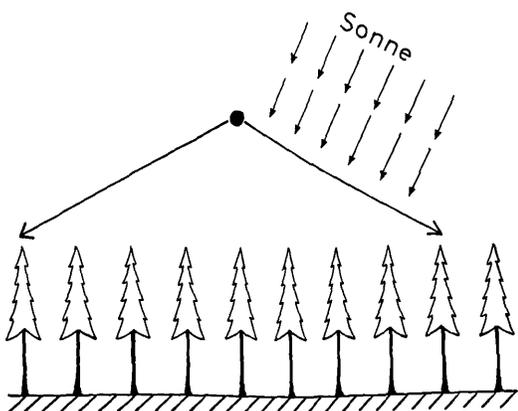
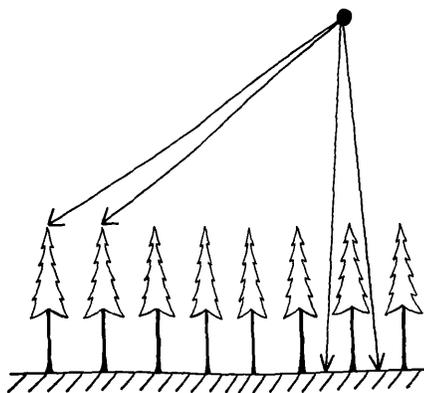


Abbildung 10

Entstehung von Inhomogenitäten in Thermalbereichen durch verschiedene Beobachtungswinkel

a) bei nadirnahen Blickrichtungen wird ein höherer Anteil tiefer Oberflächenteile erfasst als bei schräger Aufsicht. In klaren Nächten sind die unteren Zweige und der Boden in der Regel wärmer als die Baumwipfel.
 b) Liegt ein Teil des aufgenommenen Bestandes im Mitlicht, ein anderer im Gegenlicht, so werden in unterschiedlichem Maße besonnte (warme) und beschattete (kalte) Pflanzenteile im Thermalbild repräsentiert.

Inconsistencies in thermal images caused by different view angles.

a) A view direction close to the nadir comprises a higher registration rate of lower surface aspects than a tilted view. In clear nights the lower branches and the ground usually are warmer than the treetops.

b) Is one side of a registered strip in light, another in shadow, plants will be represented in the thermal image in different degrees as warm and cold.

gesamten dreidimensionalen Systems des Energiehaushaltes beliebiger Landschaftsausschnitte gäbe (Abb. 12). In diesem Falle wäre die Thermalbildnutzung an diese Modelle geknüpft. Die Thermalbilder würden eine zentrale Rolle bei der Initialisierung der Modellläufe und bei der Kontrolle der Modellergebnisse spielen. Die inhaltlichen Fragen aber würde man immer an das Modell stellen. Das Problem ist nur, daß es solche Modelle nur in Ansätzen für relativ triviale Spezialfälle und meist nur eindimensional für die vertikalen Energieflüsse gibt. Deshalb muß man die Fragen in der Regel doch direkt an das Thermalbild richten und deshalb kann auch die Auswertung bisher immer nur Teilaspekte des gesamten Energiehaushaltes betreffen. Man wird also versuchen, das Muster der Strahlungstemperaturen zur Erschließung einzelner Prozesse und Faktoren zu verwenden. Unerlässlich ist

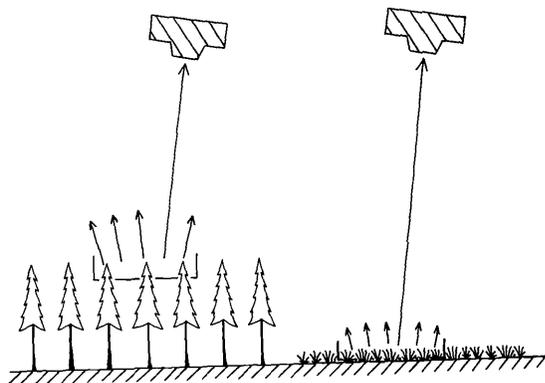


Abbildung 11

Strahlungsrelevante Oberfläche und Bezugsfläche des fühlbaren und latenten Wärmestromes bei verschiedenen Vegetationstypen.

Für die Strahlungsflüsse haben Wald und Wiese die gleiche Oberfläche. Sie ist so groß wie der entsprechende Ausschnitt einer horizontal durch den Bestand gelegten Ebene. Am fühlbaren und am latenten Wärmestrom dagegen nimmt die gesamte Blattfläche teil.

Comparison of the surface relevant for the radiation fluxes with the reference area of the sensible and latent heat flux at different vegetation types. Forest and grassland have the same surface concerning radiation fluxes. It has the size of the according horizontal area. For the sensible and latent heat flux, however, the total leave area is responsible. It depends on the vegetation types.

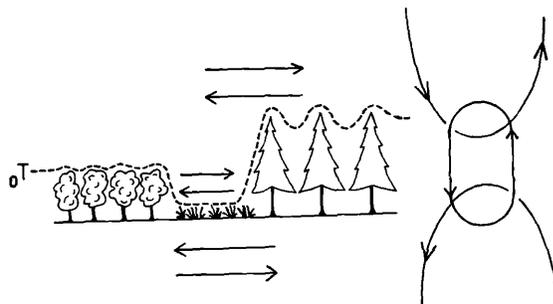


Abbildung 12

Die Oberflächentemperatur als Grenzflächenparameter im dreidimensionalen System der Wärme- und Massenflüsse eines Landschaftsausschnittes.

The surface temperature pattern as two-dimensional boundary in the three-dimensional system of the heat and mass fluxes of a geomer.

dabei aber, daß der Bearbeiter immer das komplexe Gesamtgefüge des Wärmehaushaltes im Bewußtsein behält (Abb. 13). Selbst wenn man die Grenzflächentemperatur nur als Gleichgewichtstemperatur der aktuellen Wärmeflüsse auffaßt, wenn man also alle Speichervorgänge, alle zeitlichen Gradienten, d. h. also jede Form eines Temperaturgedächtnis des Systems außer acht läßt, ist der Durchgriff von der Oberflächentemperatur auf einen der Faktoren nie trivial. Die Oberflächentemperatur als klimatologischer Parameter ist immer mehrdeutig. So kann eine in der Nacht kalt erscheinende Fläche vor einem Talausgang tiefe Oberflächentemperaturen haben, weil sie eine andere Landnutzung hat als ihre Umgebung, zum Beispiel Wiesen gegenüber offenen Ackerflächen, oder weil sich hier eine Bodeninversion und eine lokale Kaltluftpfütze gebildet haben oder weil aus dem Tal heraus kühle Luft zugeflossen ist.

Wärmehaushaltsgleichung

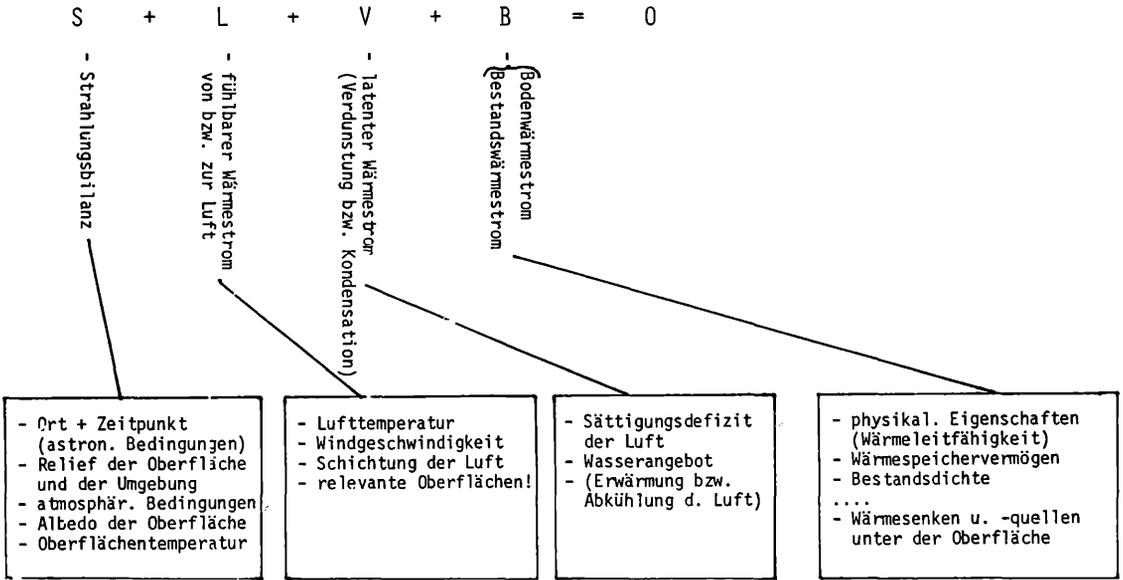


Abbildung 13

Die Hauptglieder des Wärmehaushaltes und ihre Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren.

Jeder der Energieflüsse verändert die Oberflächentemperatur und ist seinerseits von der Oberflächentemperatur abhängig.

The main constituents of the heat budget and their dependency on various influential factors. Each of the energy fluxes changes the surface temperature and is in turn dependent on the surface temperature.

Warum muß man dies alles ausführlich vorstellen? In der Vieldeutigkeit der Muster der Oberflächentemperaturen liegt die Ursache, daß seit 1970 immer wieder Leute, die sich euphorisch der Thermalbildnutzung zuwandten, nach kurzer Zeit enttäuscht aufgaben. Man muß den mühsamen Weg gehen, sich von verschiedenen Seiten schrittweise an die Information des Thermalbildes heranzutasten. Dabei stellt man immer wieder fest, daß die Strahlungstemperaturen von Landoberflächen für sich alleine meist zu wenig sind, daß man immer etwas dazutun muß, wenn man aus dem Thermalbild Gewinn ziehen will. Das können die Daten anderer Fernerkundungssysteme sein. Es können auch vorliegende thematische Karten sein. Es kann aber

auch ganz einfach Erfahrung und Wissen über die topographische Situation sein. Bereits die Gegenüberstellung eines Profiles von Strahlungstemperaturen mit entsprechenden Profilen der Waldverteilung, der Siedlungsverteilung und des Reliefs (Abb. 14) erklärt einen Großteil der Temperaturunterschiede zwingend. Der effektivste Weg der Thermalbildauswertung wird deshalb in ihrer Kombination mit anderen Informationsschichten in digitalen geographischen Informationssystemen liegen. Dies erfordert als Arbeitsschritte

- die digitale rechnerische geometrische Entzerrung und Anpassung der Thermaldaten an das Koordinatensystem der topographischen Karten, zum

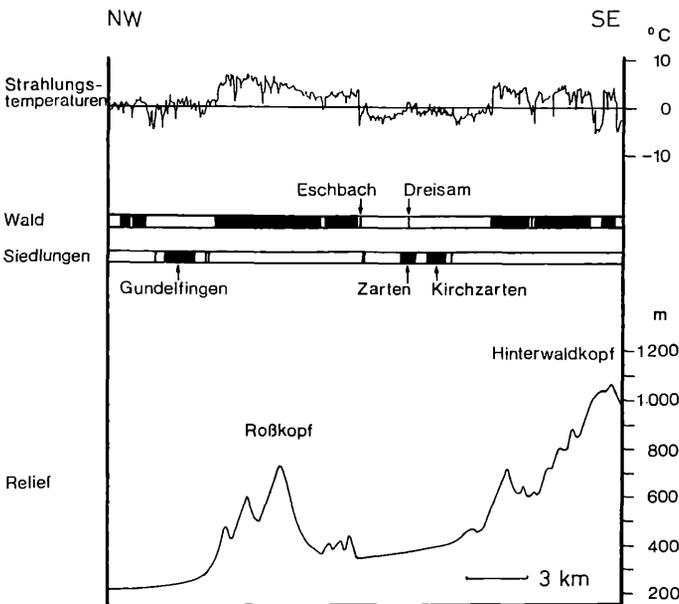


Abbildung 14

Strahlungstemperaturen, Relief, Waldverteilung und Siedlungen auf einem NW-SE-Profil von der Oberrheinebene zum Schwarzwald nördlich von Freiburg.

Strahlungstemperaturen nach der Flugzeugthermalaufnahme vom 2. 4. 1976, 4.40 MEZ. Radiation temperatures, relief, distribution of forest and built-up areas on a NW-SE profile from the Upper Rhine Valley to the Black Forest north of Freiburg. Radiation temperatures were taken by an air-borne thermal scanner on April, 2 1976, 4. 40 CET.

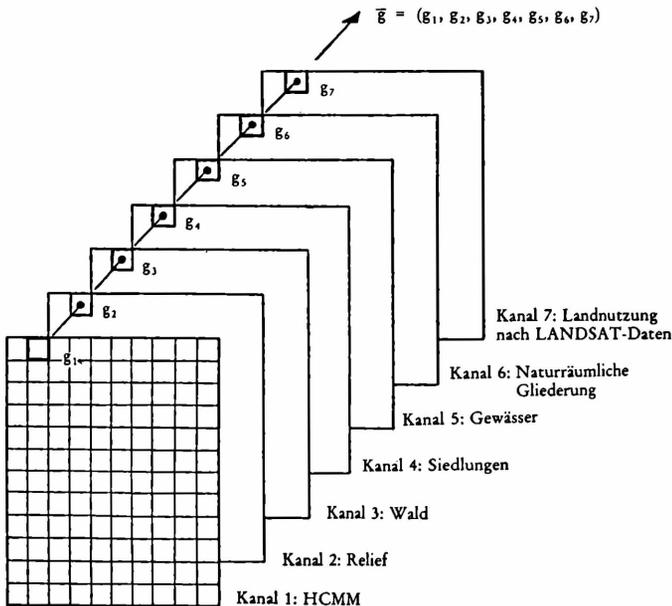


Abbildung 15

Mehrkanalige Datenstruktur zur Kombination von Thermalaufnahmen mit ergänzender Information aus anderen FE-Aufnahmen und aus digitalisierten Karten.

Multi-channel data structure representing the combination of thermal images with supplementary information from other remote sensing recordings and digitalized maps.

Beispiel an das Gauß-Krüger-System der amtlichen topographischen Karten der Bundesrepublik Deutschland,

- die gleichzeitige Digitalisierung einschlägiger Karten (Relief, Landnutzung, etc.),
- die Kombination dieser Datenebenen in mehrkanaligen Datenstrukturen (Abb. 15).

Wird dies durchgeführt, so hat man mehrere Ziele gleichzeitig erreicht:

- Das Thermalbild paßt auf einschlägige Karten und kann diesen photographisch überlagert werden. Alle in den Karten verfügbaren Informationen sind für visuelle Interpretation des thermischen Musters nutzbar.
- In einem Masking-Verfahren können beliebige „partiell homogene Teilmengen“ aus dem Thermalbild extrahiert werden, zum Beispiel das Temperaturmuster einzelner Landnutzungsklassen oder einzelner Höhenschichten.
- Alle Arten der digitalen Verknüpfung in statistischen oder deterministischen Modellen können auf die Daten angewendet werden.

5. Anwendungsbeispiele

5.1 Kaltluftseen, Kaltluftabflüsse, Oberflächentemperaturen der Wälder

In nächtlichen Satelliten-Thermalbildern erscheinen die Talsysteme aller Mittelgebirge als Bereiche kalter Oberflächen. Dies ist auch so, wenn das gesamte Areal mit Wald bedeckt ist wie beim Speyerbach im Pfälzer Wald (Abb. 16), wenn also nicht ein Unterschied der Landnutzung für die verschiedenen Temperaturen maßgebend sein kann. Es ist also möglich, mit nächtlichen Thermalbildern Areale zu kartieren, in denen sich Kaltluft sammelt, stagniert oder talauswärts weiterfließt. In zahlreichen Beispielen kann dabei auch aus dem Satelliten-thermalbild die Höhe des Kaltluftreservoirs des nächtlichen Bergwindes am Talaustritt abgeschätzt werden. Ähnliche Ergebnisse erzielten M. WINIGER u. a. (1982), die aus HCMM-Aufnahmen die Obergrenze von Inversionen in Alpentälern abgeleitet haben.

Durch die Überlagerung der Thermaldaten mit einem digitalen Geländemodell und einer digitalen

Abbildung 16

Täler als Sammelgebiete von Kaltluft und als Reservoir des Bergwindes am Talaustritt.

Talsystem des Speyerbaches im Pfälzer Wald in der Satelliten-Thermalaufnahme der Heat Capacity Mapping Mission (HCMM) vom 30. 5. 1978, 3,13 MEZ.

Hell: warme Waldoberflächen,
Dunkel: kalte Waldoberflächen.

Höhenlinien aus der TÜK 200, Bl. 7110 Mannheim.

1 = Neustadt a. d. W.

2 = Speyerbachtal

The valleys serve as a reservoir for cold air and as a tunnel for the mountain wind at the valley's mouth. Drainage system of the Speyerbach in the Pfälzer Wald, recorded with the space-borne thermal system of HCMM on June, 30 1978, 3,13 CET.

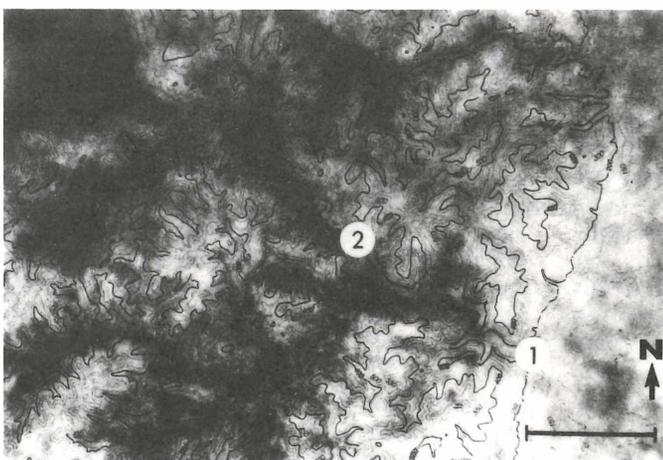
bright: warm forest surfaces

dark: cold forest surfaces

contour lines of the TÜK 200, sheet 7110 Mannheim.

1 = Neustadt a. d. W.

2 = Speyerbach valley



Landnutzungskarte können die Differenzen der Oberflächentemperaturen zum Teil quantifiziert werden. Dies erlaubt u. a. für Wälder bestimmter Höhenstufen im Schwarzwald die Erstellung einer Relativkarte der Strahlungsbilanz und dies wiederum die Ableitung einiger Thesen über die Filterwirkung der Wälder in unterschiedlicher Relief-situation bei nächtlichem Strahlungswetter. So ergab die Auswertung nächtlicher HCMM-Aufnahmen, daß bei den Wäldern des Schwarzwaldes zwischen 700 und 1000 m Höhe Temperaturunterschiede bis zu 10 K auftreten. Dabei sind die auf den Waldkämmen im Steilrelief der rhenanischen Abdachung liegenden Waldbestände warm und die auf den Hochflächen und in den Hochmulden auf der Ostseite des Schwarzwaldes stehenden Wälder kalt. Nach dem Planck'schen Gesetz entspricht bei Temperaturen von etwa 300 K die Temperaturdifferenz 1 K einem Unterschied in der langwelligen Ausstrahlung von 5 W/m^2 . Die auf den Waldkämmen der tiefeitschnittenen Schwarzwaldwestseite stehenden Wälder haben also eine bis zu 50 W/m^2 größere langwellige Ausstrahlung als die auf den Hochflächen der Ostseite. Bei gleicher Höhenlage, also etwa gleicher atmosphärischer Gegenstrahlung kann man deshalb das nächtliche Infrarot-Thermalbild als Relativkarte der Strahlungsbilanz lesen. Daraus ergibt sich zum Beispiel bei der HCMM-Aufnahme vom 30. 8. 1978 3,13 MEZ, daß die negative nächtliche Strahlungsbilanz der warmen Rheinseite des Schwarzwaldes um einen Betrag von 50 W/m^2 größer war als die der kalten Wälder auf anderen Standorten, zum Beispiel -70 W/m^2 im Westen, -20 W/m^2 im Osten. Bei Abbildung 17 ist eine Temperaturdifferenz von 4° und dementsprechend ein Unterschied der langwelligen Bilanz von 20 W/m^2 zu Grunde gelegt.

Versucht man diese Differenzierung aus dem Gesamtwärmehaushalt heraus zu verstehen, so kommt man zu dem Ergebnis, daß die warmen Wälder den größeren Energieverlust im Strahlungshaushalt im wesentlichen dadurch kompensieren, daß sie einen entsprechend großen Energiestrom durch Wärmeleitung aus der Luft heraus ziehen. Dies erscheint

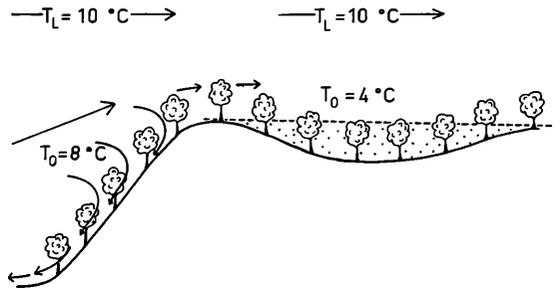


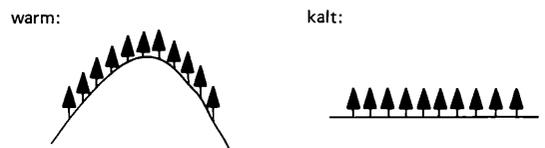
Abbildung 18

Strömungsverhalten der Luft in Wäldern unterschiedlicher Lage im Relief in windschwachen Strahlungsnächten.

Auf ebenen Flächen und in Hohlformen füllt die an den äußeren Blättern gekühlte Luft den Bestand und stagniert darin. Auf Kämmen und an Hängen fließt sie im Bestand ab. Hier wird ständig neu warme Luft der freien Atmosphäre in die turbulenten Wärme-flüsse einbezogen.

Wind flow patterns in forests of varying positions in the relief during calm clear weather nights. The air which has been cooled by the outer leaves fills the forest on even surfaces and hollow forms and stagnates therein. On crests and steep slopes cooled air sinks to the valley floor and is permanently replaced by new air.

zunächst paradox, denn der Temperaturunterschied zwischen den Waldoberflächen und der Lufttemperatur bei den warmen Wäldern ist wesentlich kleiner als bei den kalten. Möglich ist dies nur durch ein völlig anderes Strömungsverhalten der Luft im Bestand (vgl. Abb. 18). Auf den Hochflächen füllt die am Abend gebildete Kaltluft den Bestand auf und stagniert darin. Auf den Rücken und den steilen Hängen dagegen fließt die gekühlte Luft rasch ab und wird immer wieder durch noch nicht gekühlte Luft aus der freien Atmosphäre ersetzt. An den Waldkämmen wird also ein wesentliches größeres Luftvolumen in die Abkühlung einbezogen und das gesamte Laub- oder Nadelwerk des Bestandes nimmt Wärme aus der Luft auf. Auf den Hochflächen dagegen nehmen nach der ersten Abkühlungsphase am Abend nur noch die Baumspitzen Wärme aus der Luft auf. Das Temperaturmuster von Waldoberflächen in nächtlichen Satelliten-



Lufttemperatur	10°	10°
Oberflächentemperatur	8°	4°
Temperaturdifferenz	2°	6°
	1 : 3	

Langwellige Ausstrahlung (E)	360 W/m ²	340 W/m ²
atmosphärische Gegenstrahlung (A)	300 W/m ²	300 W/m ²
langwellige Bilanz (A - E)	-60 W/m ²	-40 W/m ²
Aufbrauch von Bestands-wärme (Speicher vom Tage her)	20 W/m ²	20 W/m ²
erforderlicher fühlbarer Wärmestrom von der Luft zum Bestand	40 W/m ²	20 W/m ²
	2 : 1	

Abbildung 17

Vergleich der Temperaturen und der vertikalen Energieflüsse an Waldbeständen verschiedener Lage im Relief in windschwachen Strahlungsnächten (Beispiel).
Comparison of temperatures and vertical energy fluxes at forest stands in different relief situations during calm clear nights.

Thermalbildern offenbart also damit drei verschiedene Sachverhalte:

- Die am wärmsten erscheinenden Wälder liefern den größten Beitrag zur nächtlichen Abkühlung der Luft
- darüberhinaus liefern sie den größten Beitrag zur Produktion nächtlicher Frischluftströme an Talausgängen
- und schließlich werden diese Bestände am intensivsten von Luft durchströmt und haben damit in Strahlungsnächten die stärkste Filterwirkung.

Gleichzeitig ergeben sich neue Aspekte zu der alten Frage, ob Wälder oder Wiesen die Hauptproduzenten nächtlicher Bergwinde und damit von Frischluftströmungen an Talausgängen sind. Große Grünlandareale sind an Steilhängen des Schwarzwaldwestrandes ebenso kalt oder noch kälter als die Wälder der Hochflächen und damit viel kälter als die ihnen benachbarten Waldbestände. Aus ihnen fließt sicher besonders kalte Luft hangabwärts aus. Darum sind auch die Wiesen oberhalb von Weinbergen und Obstkulturen eine zusätzliche Frostgefahr. Aber: der Gesamtenergieumsatz ist bei den Wäldern wesentlich größer. Nur so können sie ihre hohe Oberflächentemperatur während der ganzen Nacht erhalten. Das Fazit kann nur lauten, daß Wälder im Einzugsbereich eines Tales zwar nicht ganz so kalte „Frischluft“ produzieren als benachbarte Wiesen, aber dafür in größeren Mengen.

5.2 Städtische Wärmeinsel, Nachbarschaftseffekte in Ballungsräumen

Es war zu erwarten und auch die erste Feststellung aller Bearbeiter von Satelliten-Thermalbildern, daß sich große Städte aufgrund der erhöhten Oberflächentemperaturen in Satelliten-Thermalbildern als „hot spots“ zeigen. Dabei ist zunächst offen, ob dieses Phänomen vor allem durch die besonderen physikalischen Eigenschaften städtischer Oberflächen oder durch die an die Städte gebundene Abwärmeproduktion hervorgerufen wird. Der Vergleich von Thermalbildern mit Karten der Abwärmeproduktion zeigt in der Tat eine hohe Übereinstimmung der Muster in beiden Abbildungen. Dies ist jedoch zunächst nur eine hohe räumliche Koinzidenz und braucht noch keine Kausalität zu beinhalten. Eine vorsichtige Abschätzung auf der Basis der in Abwärmekatastern genannten Energieströme unter der Voraussetzung, daß nur etwa 10% der Abwärme in Form erhöhter Ausstrahlung aufgeheizter Oberflächen abgegeben werde, kommt zu dem Ergebnis, daß von der immer mehrere Grad betragenden Erhöhung der Strahlungstemperaturen der Städte nur ca. 0,5° unmittelbar der Abwärme zuzuschreiben sind. Der bedeutendere Anteil muß wohl doch auf das spezifische Verhalten städtischer Oberflächen gegenüber den natürlichen Wärmequellen an Landoberflächen zurückgeführt werden. Eine Folge davon ist, daß die horizontale wechselseitige Beeinflussung benachbarter Areale unterschiedlicher Landnutzung in der Regel im Thermalbild nicht offen liegt. Auch wenn Einflüsse eines städtischen Areales auf die Oberflächentemperaturen des Umlandes einwirken, sind sie in der Regel durch stärkere andere Effekte so überlagert, daß sie durch die einfache Bildinterpretation nur bei günstigen Voraussetzungen erfaßt werden können. Ein

Beispiel für die Erfassung eines thermischen Schweißes einer Großstadt lieferte die HCMM-Aufnahme vom 30.5.1978, 3,13 MEZ im Raum Straßburg (Abb. 19). In dieser Nacht bestand bei stabiler Schichtung unter einer niedrig liegenden Inversion eine flache nordwestliche Strömung (Flughafen Straßburg-Entzheim: 320°; 2,0 m/sec). Das HCMM-Bild zeigt einen etwa 10 km langen warmen Schweiß auf der Leeseite von Straßburg.

In einer analytischen Arbeit zu dieser Frage hat W. HANZO (1984) ähnliche Lee-Effekte im Ruhrgebiet nachgewiesen. Er nutzte hierfür eine 3-kanalige Datenstruktur mit den folgenden Ebenen:

- HCMM-Szene vom 30. 8. 1979, 14,44 MEZ (Tag-Infrarot)
- HCMM-Szene vom 16. 9. 1979, 4,00 MEZ (Nacht-Infrarot)
- digitalisierte Karte der Verwaltungseinheiten (Gemeinden) mit der zugehörigen Arealstatistik der Landnutzungsklassen und Oberflächenarten nach 44 Merkmalen.

W. HANZO stellte die mittleren Strahlungstemperaturen der Gemeinden den Flächenanteilen der verschiedenen Landnutzungsklassen gegenüber und schöpfte mit einer Regressionsanalyse den Einfluß der Landnutzung innerhalb einer Gemeinde auf die Strahlungstemperatur dieser Gemeinde ab. Die verbleibenden Residuen zeigen deutlich die leewärtige Verschiebung der Gesamtwärmeinsel des Ruhrgebietes, insbesondere zur Zeit der Tagaufnahme am 30.8.1979 (Abb. 20). Bei einem frischen SO-Wind (Wetteramt Essen: 150°; 3,0 m/sec) ergaben sich auf der N- und NW-Seite des Ruhrgebietes positive Residuen von etwa 1 K (Hamm +0,7 K, Karl 1,0 K, Hünxe 1,4 K etc). Negative Residuen dominieren die südlichen Bereiche (Dortmund -0,1 K, Essen -0,4 K, Hagen -1,3 K etc). Im Vergleich mit den Schätzwerten der Regression sind Gemeinden der Leeseite bis zu 1,5 K wärmer, die der Luvseite bis zu 0,5 K kälter.

5.3 Synthetische Karten der Wärmebelastung

Neue Ansätze der Biometeorologie und Bioklimatologie arbeiten anstelle der klassischen Schätzgrößen für Wärmebelastung oder Kältestreß des Menschen (Äquivalenttemperatur, Abkühlungsgröße etc.) mit Modellen des Gesamtwärmehaushalts des Menschen (G. JENDRITZKY u.a. 1977, P. HÖPPE 1984). Die Aufgabe, auf der Basis solcher Modelle die von der Regionalplanung dringend erwünschten Karten der Wärmebelastung zu erstellen, gliedert sich in mehrere Arbeitsschritte (G. JENDRITZKY 1984). Zunächst war das Modell soweit zu vereinfachen, daß es allein mit den Routinemeßdaten der Stationen des synoptischen Netzes alle Wärme-flüsse parametrisiert. Somit konnte an den 68 Stationen der Bundesrepublik Deutschland für einen langen Zeitraum (z. B. für die 30-jährige Normalperiode) für jeden Monat des Jahres die Zahl der Tage bestimmt werden, an denen ein Durchschnittsmittelleuropäer („Klimamichel“) unter Wärme- oder Kältestreß leidet. Bei einem ersten Versuch, von diesen Stützstellen aus mit Hilfe eines stochastischen Regressionsmodelles Bioklimakarten ganzer Bundesländer zu entwickeln hat G. JENDRITZKY (1984) als Variablen die geographischen Koordi-

Abbildung 19

Thermischer Schweif im Lee einer Großstadt. Agglomeration und Umland von Straßburg in der Satelliten-Thermalaufnahme der Heat Capacity Mapping Mission (HCMM) vom 30. 5. 1978, 3,13 MEZ.

Hell: warme Oberflächen,
Dunkel: kalte Oberflächen.
Siedlungsmuster aus der TÜK 200, Bl. 7910, Freiburg-Nord.

Lee side thermal tail of a big city. The agglomeration of Strasbourg and its surrounding area recorded in the HCMM thermal image from June, 30, 1978, 3,13 CET.

bright: warm surfaces

dark: cold surfaces
settlement patterns taken from TÜK 200, sheet 7910, Freiburg Nord.

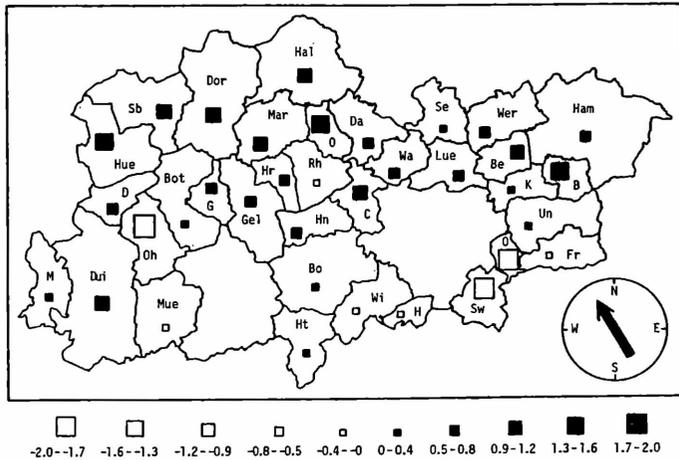


Abbildung 20

Thermische Lee-Effekte einer großen Agglomeration. Residuen einer Regression der Strahlungstemperaturen nach den Anteilen verschiedener Landnutzungsclassen in den einzelnen Gemeinden des Ruhrgebietes.

Nach dem Abschöpfen des Eigenanteiles der Kommunen an der Varianz der Strahlungstemperatur durch eine lineare Regression ergibt sich eine Zweiteilung des Ruhrgebietes in eine kühlere Luv- und eine wärmere Leeseite.

Thermal shadow-effect of a big agglomeration. Residuals of a regression analysis. Predicted variables: average brightness temperatures of administrative spatial units. Predictors: statistics of land use and surface properties. The residuals show the agglomeration effect with a cooler wind-exposed and a warmer leeside area.

naten, die Seehöhe und einen Reliefparameter als Hilfsgrößen verwendet. Das Ergebnis ist bereits eine wesentliche Verbesserung der Becker'schen Bioklimakarte. Aufgrund der Variablen für das stochastische Modell können jedoch bioklimatisch wesentliche Raumparameter wie die Art der Landnutzung und die Lage in lokalen Zirkulationssystemen in diesen Karten keinen Niederschlag finden. Deshalb ist es auch nicht sinnvoll, diese Karten über den Maßstab 1 : 500 000 hinaus zu vergrößern. Um diese Probleme zu überwinden, hat G. MENZ (1986) zunächst für den sommerlichen Wärmestreß

ein neues stochastisches Modell entwickelt. Dabei werden als Variablen neben den Reliefeigenschaften die Landnutzung einer etwa 3 x 3 km² großen Umgebung und die Oberflächentemperaturen herangezogen. Er hat zu diesem Zweck ein geographisches Informationssystem aus einer Tag-Infrarot-Aufnahme des HCMM, einem digitalen Geländemodell und einer Landnutzungskarte nach Landsat-Daten gebildet. Mit Hilfe dieser Informationen wird die für die einzelnen Synop-Stationen berechnete Schwülebelastung regionalisiert. Die als Beispiel erstellte Karte der Wärmebelastung des Raumes

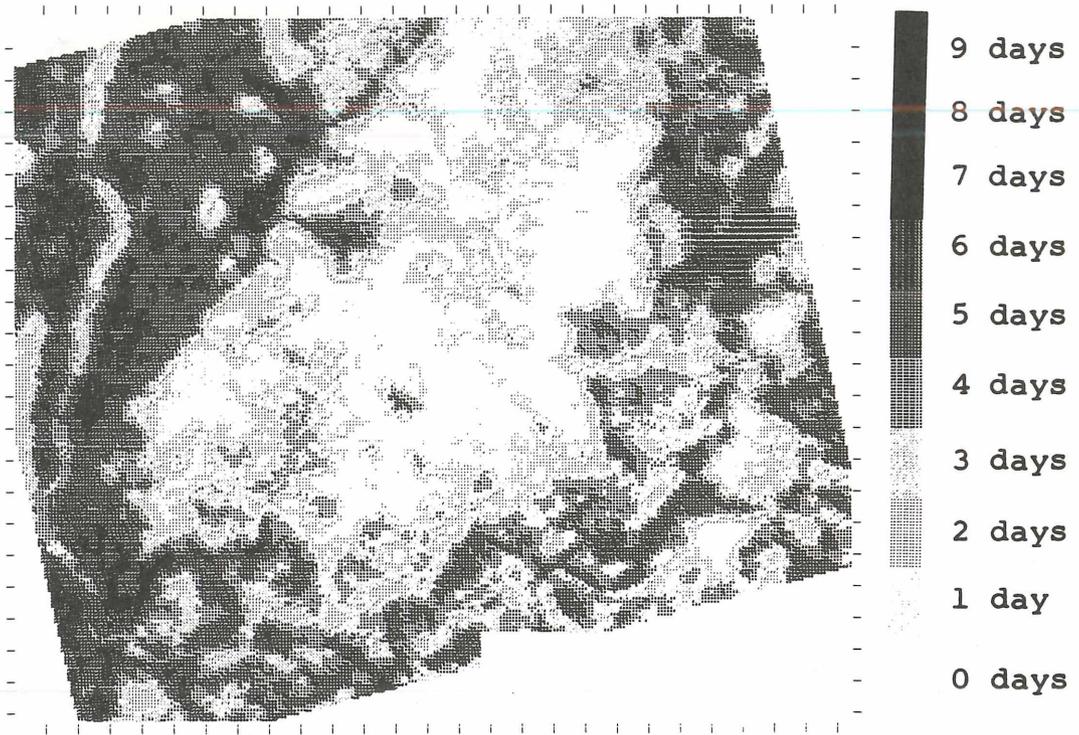


Abbildung 21

Karte der Wärmebelastung (Tage mit Hitzestress im Juli) für den Raum Freiburg-Basel (nach G. MENZ 1986).
Map of heat-stress of the area Freiburg-Basel (heat-stress days in July) according to G. MENZ (1986).

Basel-Freiburg für den Monat Juli (Abb. 21) zeigt, daß dieses Verfahren eine hohe räumliche Differenzierung und die Erstellung von Bioklimakarten etwa bis zum Maßstab 1 : 50 000 erlauben wird. Gleichzeitig ist diese Arbeit ein Beispiel dafür, wie aus der Kombination von Satelliten-Thermalbildern, anderen Fernerkundungsdaten und digitalisierten Karten in geographischen Informationssystemen neue Daten erzeugt und neue Aufgaben gelöst werden können.

6. Diskussion

Wo liegen die Grenzen der räumlichen Auflösung der Satelliten-Thermalbilder? Was ist machbar, was sinnvoll?

– Es geht darum, sehr kleine Energiemengen genau zu messen. Man kann beim jeweiligen Stand der Technik von der radiometrischen und der geometrischen Auflösung immer nur die eine auf Kosten der anderen verbessern. Wollte man Thermalbilder als Basis topographischer oder physischer Karten eines Raumes verwenden, so entspräche eine Bildelementgröße von 500 m etwa einem Kartenmaßstab 1 : 2 000 000. Bei den typischen Anwendungen von Thermalbildern ist es aber sinnvoll, der thermischen Information der einzelnen Bildelemente die komplexere topographische Situation an dieser Stelle und in seiner Umgebung gegenüberzustellen. Bei HCMM mit 500 m Auflösung hat sich deshalb der Maßstab 1 : 200 000 als angemessen erwiesen, bei LANDSAT-TM mit 120 m Auflösung werden 1 : 100 000 und 1 : 50 000 angemessen sein.

Für die Satelliten der 90-er Jahre wird eine räumliche Auflösung im thermischen Kanal von 50 bzw.

30 m angestrebt. Es ist aber festzuhalten, daß auch die vorliegenden Satelliten-Thermaldaten mit ihrer größeren Auflösung bisher nur zu einem kleinen Bruchteil in Wert gesetzt wurden.

Inwieweit werden geologische und bodenkundliche Informationen aus Thermalbildern gewonnen?

– Geologische und pedologische Muster können in Thermalbildern reproduziert werden. Aber – sofern Vegetation vorhanden ist, d. h. in allen humiden Gebieten – nur dadurch, daß geologische Einheiten auch Reliefeinheiten bilden (Oberrheinebene, Schwarzwald etc.), daß geologische und pedologische Einheiten auch Landnutzungseinheiten sind, oder daß das unterschiedliche Bodenwasserangebot den latenten Wärmestrom limitiert. Dann erzeugen Reliefform und Vegetationstyp die entsprechenden Muster im Thermalbild. Die dabei zwischen den Vegetationsoberflächen und der Atmosphäre auftretenden Energieflüsse sind um Größenordnungen höher als die vertikalen Energieflüsse im Boden. Ein direkter Durchgriff von Oberflächentemperaturen (insbesondere von den Tagesamplituden) auf physiko-chemische Substrateigenschaften ist nur in ariden Gebieten möglich.

Welche Rolle spielt der ja oft zufällige Zeitpunkt der Aufnahme für die Auswertung? Wie erreicht man eine Repräsentanz für größere Zeiträume und die Aussage überzeitliche Abläufe z. B. über die saisonalen Veränderungen?

– Thermalaufnahmen sind zeitpunktbezogene und zeitpunktabhängige Daten, repräsentativ in jedem Falle nur für wolkenfreies Hochdruckwetter. Die Bezeichnung „Schönwetterverfahren“ gilt hier noch mehr als bei den Aufnahmen mit Multispektral-

abtastern im solaren Spektrum. Denn ein Landnutzungsmuster, das an einem wolkenfreien Tag aufgenommen wurde, ist am darauffolgenden Regentag noch genauso vorhanden, das thermische Muster ist dann völlig anders.

Andererseits gilt aber: Thermalbilder von wind-schwachen Strahlungstagen zeigen die Extremfälle der horizontalen Differenzierung der Oberflächentemperaturen. Das andere Extrem ist eine rein vertikale, den adiabatischen Gradienten entsprechende Differenzierung auch der Oberflächentemperaturen an windreichen Tagen mit geschlossener, tief liegender Wolkendecke. Die Frage ist deshalb, wie stark sich verschiedene bei Strahlungswetter aufgenommene Thermalbilder unterscheiden. Hier gibt es eine überraschend hohe Persistenz der Muster. Die Temperaturdifferenzen benachbarter Flächen sind von der Windgeschwindigkeit abhängig, aber die Muster erstaunlich stabil, solange man die entsprechenden Tageszeiten vergleicht. Daraus ergibt sich der Optimismus, daß auch wenige im Jahres- und Tagesgang gut platzierte Aufnahmen einen großen Beitrag zur klimatologischen Betrachtung des Raumes liefern.

Ein wesentlicher Zweig der Anwendung der Oberflächentemperaturen ist ihre Nutzung als Parameter in Modellen wie bei der synthetischen Erzeugung von phänologischen Karten und von Karten des Wärmestresses. Welche relative Bedeutung hat dabei die Oberflächentemperatur neben den anderen Indikatoren wie dem Relief und der Landnutzung?

- Da es sich hierbei um statistische Regressionsmodelle handelt, kann man sich an die rechnerisch bestimmte Varianzaufklärung für die einzelnen Prädiktoren halten. Bei der Karte der Wuchsklimastufen wird in der Tat ein sehr hoher Anteil der Varianz (ca. 90%) bereits durch das digitale Höhenmodell abgeschöpft. Dabei könnte jedoch eine Rolle spielen, daß auch die Originalkarte von Ellenberg und Schreiber aus Profilmessfahrten mit Hilfe der Isohypsen intrapoliert wurde.

Generell gibt es eine Redundanz von Relief, Landnutzung und Thermalbildern. Jeder der drei Faktoren liefert eine höhere Varianzaufklärung wenn er vor den beiden anderen in die Regression einbezogen wird.

Landschaftsökologische Arbeiten vollziehen sich heute meist in größeren Maßstäben als die hier angegebene Schwelle von 1 : 50 000. Wie weit könnte man sinnvoll vergrößern?

- Die Grenze ist zur Zeit gegeben durch die 120 m-Bildelemente von Landsat-TM, die bei sorgfältiger geometrischer Bearbeitung etwa mit 50 m Zielgenauigkeit der Karte zugeordnet werden können, also Flächenstücke von gut 1 ha mit einer Lageunsicherheit von etwa 0,5 ha. Das kann auf jeden Maßstab vergrößern. Ob es bei Arbeiten im Maßstab 1 : 10 000 oder 1 : 5 000 eine Hilfe ist, möchte ich bezweifeln.

Für die größeren Maßstäbe würden sich aber doch die Flugzeug-Thermalaufnahmen anbieten?

- Sicher. Gängige Systeme (Bendix M²S oder Daedalus) liefern bei 4 000 m Flughöhe 10 m-Pixel und bei 1 000 m Flughöhe 2,5 m-Pixel. Allerdings ist die geometrische Korrektur und die Überlagerung mit der Karte bei Flugzeugscanneraufnahmen in

reliefiertem Gelände bis heute ein sehr schwieriges Problem, weil das Flugzeug im Gegensatz zum Satelliten durch seine Eigenbewegungen von Scanzeile zu Scanzeile eine Anpassung der Algorithmen erfordern würde.

Flugzeugthermalaufnahmen haben auch noch den großen Nachteil, daß die Richtungsabhängigkeit der Daten wesentlich stärker zum Tragen kommt. Dies spricht für die Satellitendaten, auch wenn ihre Auflösung schlechter ist.

Zu Aussagen in größeren Maßstäben könnte man vielleicht kommen, wenn man zum Beispiel mit den vorhandenen LANDSAT-TM-Aufnahmen Temperaturmodelle entwickelt, die man dann auf höher aufgelöste Datensätze übertragen kann.

- Das ist ein wichtiger Punkt. Es gibt gerade mit den Daten von LANDSAT-TM solche Versuche. Man kann auf der Basis der 120 m-Auflösung eine Regression zwischen den Thermaldaten und den Aufnahmen in den anderen sechs Kanälen durchführen und die so gewonnene Gleichung dann auf die in 30 m Auflösung vorliegenden Daten dieser sechs Kanäle anwenden, um so ein synthetisches Temperaturbild mit 30 m Auflösung zu erzeugen. Wir versuchen so etwas gerade in einer Zulassungsarbeit mit NOAA-Daten und einem geographischen Informationssystem auf ha-Basis.

Müßte nicht wie bei Straßburg auch bei allen großen Kraftwerken, Raffinerien u. s. w. die Abwärme im Thermalbild sichtbar werden?

- Bei der Erfassung des thermischen Schweißes von Straßburg war die meteorologische Situation besonders günstig: stabile Schichtung der bodennahen Luft, schwache Strömung aus NNW. Einzelne Kraftwerke und Anlagen der chemischen Industrie erscheinen als „hot spots“. Eine Temperaturerhöhung der Umgebung habe ich bisher noch nicht beobachtet.

Kann man aus den Unterschieden der Luftbewegung auf Hochflächen und auf Hanglagen in Strahlungsnächten eine Begründung ableiten für die Häufung von Waldschäden im Schwarzwald in Hanglagen über 800 m?

- Das ist eine These, die ich vertrete. Man muß aber sehen, daß für die Konzentration der Schäden in diesem Bereich viele Gründe eine Rolle spielen:

- die Häufung von Inversionen mit ihrer Schadstoffkonzentration in diesen Höhenlagen,
- der Naßeintrag bei W-Lagen mit Staubewölkung am Schwarzwald etc..

Wenn überhaupt, so kann diese These nur einen Teilaspekt bei der Klärung der Schadensverteilung abdecken.

7. Zusammenfassung

SCHLÜSSELWÖRTER: Infrarot - Thermalbild - Oberflächentemperaturen - Wärmehaushalt - Kaltluftseen städtische Wärmeinsel Wärmebelastung

ZUSAMMENFASSUNG: Wegen der großen räumlichen und zeitlichen Differenzierung der Luft-, Bestands- und Bodentemperaturen ist bei landschaftsökologischen Arbeiten eine bessere Erfassung der dreidimensionalen Temperaturfelder und

ihrer zeitlichen Verläufe erforderlich. Die Aufnahme der Oberflächentemperaturen mit Thermalab-tastern ist dabei ein wichtiges Hilfsmittel. Erforderlich ist in jedem Fall die Abschätzung der Fehlerquellen und Inhomogenitäten der Aufnahmen (unterschiedliches Emissionsvermögen, Einfluß der Atmosphäre, verschiedene Blickwinkel etc.). Wegen der Mehrdeutigkeit der Oberflächentemperaturen als klimatische Parameter sind in der Regel ergänzende Datenebenen (Geländemodell, Landnutzungs-muster) und Geländemessungen an Einzel-punkten für die Auswertung erforderlich.

Als Anwendungsbeispiele werden die Kartierung von nächtlichen Kaltluftansammlungen, die Frage der nächtlichen Frischluftproduktion verschiedener Vegetationsbestände in reliefiertem Gelände, die Erfassung der städtischen Wärmeinsel und des thermischen Einflusses großer Städte auf ihr Um-land, sowie die Ableitung von Karten der Wärme-belastung aus Fernerkundungs-Daten behandelt.

Summary

Thermal images and surface temperatures

KEY WORDS: infrared – thermal image – surface temperature – heat balance – radiative cooling – urban heat island – heat stress

SUMMARY: It is necessary that ecological studies find a better method to get hold of threedimensional temperature fields because of the complex thermal behaviour of air, vegetation and soil.

For this, temperature mapping by thermal scanners is a helpfull method. For the use of thermal images it is necessary to discuss the validity and homo-geneity of the data (influences of emissivity, atmo-sphere, view angles etc.).

Supplementary levels of data (digital terrain model, land-use patterns) and field measurements must be added to be able to interpret the recorded surface temperatures. Without those data, surface tempera-tures are ambiguous and invalid to function as climatic parameters.

To show some examples of application, in this report the build-up of cold air layers at night, the effect to different vegetation types on the nightly slope and mountain winds, the mapping of the urban heat island, the thermal influence of big cities on their environment, and the production of a map of heat stress from remote sensing data are considered.

8. Literatur

BAUMGARTNER, A., MAYER, H. & NOACK, E.-M. (1985):

Thermalkartierungen in bayerischen Großstädten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Materialien Nr. 39.

GEIGER, R. (1960):

Das Klima der bodennahen Luftschicht. – Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie, 4. Aufl., Braunschweig.

GOSSMANN, H. (1977):

Radiometrische Oberflächentemperaturenmessung und Thermalbild als Hilfsmittel der Umweltforschung. – In: Geogr. Rdsch., 7, Nr. 3, S. 101 – 112.

GOSSMANN, H. (1984):

Satelliten-Thermalbilder. Ein neues Hilfsmittel für die Umweltforschung? – In: Fernerkundung in Raumordnung und Städtebau, H. 16.

GOSSMANN, H. (1982):

Grundlegende Probleme der Thermalbildauswertung über Landflächen. – In: Akad. f. Raumforschung und Landes-planung, Beiträge 62, S. 5 – 22.

HANZO, W. (1984):

Die Oberflächentemperaturen administrativer Raumeinheiten im Ruhrgebiet und ihre Verknüpfung mit Statistiken und Karten der Landnutzung. – Zulassungsarbeit f. das Staatsexamen (unveröffentlicht). Universität Freiburg, Institut f. Physische Geographie.

HÖPPE, P. (1984):

Die Energiebilanz des Menschen. – Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München Nr. 49.

JENDRITZKY, G. (1984):

Bioklimatic maps of heat stress of man. – In: KIRCH-HOFER, W., OHMURA, A. & WANNER, H. (Hrsg.): Applied Climatology, Züricher Geogr. Schriften, 14, S. 101 – 102.

JENDRITZKY, G., SÖNNING, W. & SWANTES, H.-J. (1979):

Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschafts-planung („Klima-Michel-Modell“). – In: Beiträge Akad. Raumforschung und Landesplanung, Bd. 28, Hannover.

LAUSCHER, F. (1953):

Die Rolle mikroklimatischer Faktoren beim Massenauf-treten von Waldschädlingen. – In: Wetter und Leben, 5, S. 195 – 200.

LORENZ, D. (1973):

Die radiometrische Messung der Boden- und Wasser-oberflächentemperatur und ihre Anwendung insbeson-dere auf dem Gebiet der Meteorologie. – In: Ztschr. f. Geophysik, Bd. 39, S. 627 – 701.

LORENZ, D. & BAUMGARTNER, A. (1970):

Oberflächentemperatur und Transmission infraroter Stah-lung in einem Fichtenwald. – Archiv Meteor., Geophys., Bioklimat., Ser. B., 18, S. 305 – 324.

MENZ, G. & JENDRITZKY, G. (1986):

Deduction of human-bioklimatological maps by means of remote sensing data and a digital terrain model using a correlation approach. – In: Freiburger Geogr. Hefte, 26, S. 132 – 144.

WINIGER, M., NEJEDLY, G. & SCHWAB, Z. (1982):
Satellitendaten in der Geländeklimatologie. – Resultate des Projektes HCMM. Geographica Helvetica 4, S. 199 – 207.

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. H. Goßmann
Institut für Physische Geographie
der Universität Freiburg
Werderring 4
78 Freiburg

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Laufener Spezialbeiträge und Laufener Seminarbeiträge \(LSB\)](#)

Jahr/Year: 1990

Band/Volume: [1_1990](#)

Autor(en)/Author(s): Goßmann Hermann

Artikel/Article: [Thermalbilder und Oberflächentemperaturen 23-38](#)