

04.06 Oberflächentemperatur bei Tag und Nacht (Ausgabe 1993)

Problemstellung

Die Einbeziehung klimatologischer Gesichtspunkte in die Bewertung der Umweltsituation städtischer Ballungsgebiete und deren räumliche Planung setzt zunächst eine Definition des Begriffes **Stadtklima** voraus. Unter Stadtklima versteht man nach Schirmer et al. (1987) "das gegenüber dem Umland stark modifizierte Mesoklima von Städten und Industrieballungsräumen. Es umfaßt das gesamte Volumen der bodennahen Luftschicht oberhalb und in unmittelbarer Umgebung der Stadt bzw. der städtischen Grenzschicht. Verursacht wird es durch die Art und Dichte der Bebauung, das Wärmespeichungsvermögen der Baustoffe, die Versiegelung des Bodens, das Fehlen von Vegetation, durch einen veränderten Wasserhaushalt und die vermehrte Emission von Abgasen, Aerosolen und Abwärme."

Für die Bewertung der jeweiligen Klimasituation fehlen verbindliche Grenz- und Richtwerte. Als Idealzustand sollte ein Stadtklima angestrebt werden, das weitgehend frei von Schadstoffen ist und den Stadtbewohnern eine möglichst große Vielfalt an Atmosphärenzuständen unter Vermeidung von Extremen bietet (vgl. Deutsche Meteorologische Gesellschaft 1989).

Zur Erfassung des städtischen Klimas bietet sich neben der Anwendung der Methoden der klassischen klimatologischen Forschung mit Meßfahrten und Meßgängen (vgl. Karten 04.02 - 04.05) auch die Berechnung der Temperaturen der einzelnen Oberflächenelemente (Dächer, Straßen, Baumkronen usw.) mittels **Thermal-Infrarot(IR)-Rasteraufnahmen** an. Dabei wird von dem physikalischen Prinzip ausgegangen, daß alle Körper entsprechend ihrer Oberflächentemperatur **Wärmestrahlung** abgeben (vgl. Methode).

Als Steuerungsgröße für den Wärmehaushalt der Erdoberfläche kommt der Wärmestrahlung und damit der Oberflächentemperatur als Bestandteil der Strahlungsbilanz jedes Körpers eine große Bedeutung zu. Während tagsüber der **kurzwellige** Strahlungsbereich vor allem mit der direkten Einstrahlung der Sonnenenergie und ihrer Absorption bzw. Reflexion (Albedo, vgl. Tab.1) an der Körperoberfläche bestimmend ist, beeinflusst nachts der **langwellige** Bereich mit dem Bodenwärmestrom ausschließlich das thermische Ausstrahlungsverhalten eines Körpers.

| Tab. 1: Albedo (Reflexionsvermögen) verschiedener Oberflächen (Nachbarschafts- verband Stuttgart 1992) | |
|--|---------------------------|
| Oberflächen- beschaffenheit | Reflexions- anteil (%) |
| schwarze Erde, trocken | 14 |
| schwarze Erde, feucht | 8 |
| heller Sand | 30 – 40 |
| Schnee, sauber | 99 |
| Wasserflächen | 5 – 15 |
| grünes Gras | 26 |
| Weizen | 10 – 25 |
| Beton | 14 – 22 |
| Mauer, weiß | 65 – 80 |
| Mauer, gelb | 35 – 50 |
| Mauer, grau | 20 – 45 |
| Asphalt | 12 – 25 |
| Schotter | 5 – 10 |
| Mittelwert der Erdoberfläche | 35 |

Tab. 1: Albedo (Reflexionsvermögen) verschiedener Oberflächen (Nachbarschaftsverband Stuttgart 1992)

Je nach Art und Beschaffenheit von Oberflächen ergeben sich deshalb bei gleichen Einstrahlungs- und Ausstrahlungsbedingungen u.U. erhebliche Unterschiede in der Oberflächentemperatur (vgl. Abb.1).

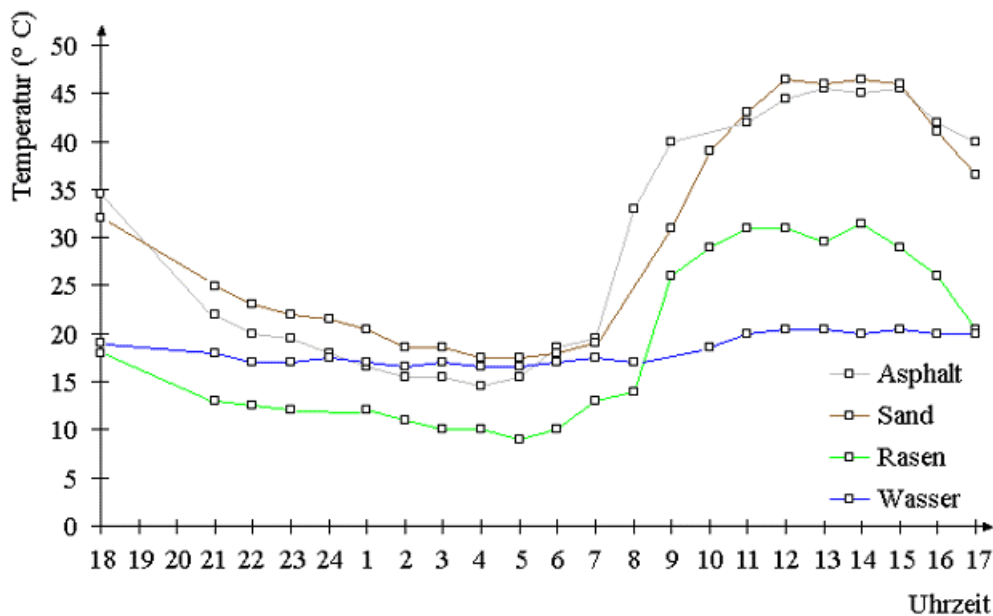


Abb.1 : Oberflächentemperaturen verschiedener Strukturen (Kessler 1971 in: Mählenhoff 1989)

Für (städtische) Klimaanalysen liegt der wesentliche Nutzen von Thermalkarten in ihrem **flächenhaften, digital verarbeitbaren Informationsgehalt**. Es ist zu unterscheiden zwischen Infrarot-Aufnahmen mit Thermal-Scannern von Flugzeugen aus und den für die vorliegenden Karten benutzten **Satellitendaten**.

Unter Berücksichtigung der Größe Berlins und des engeren Verflechtungsraumes von fast 2 000 km² ermöglicht nur ein satellitengestütztes Verfahren die jeweils fast **zeitgleiche Erfassung** der langwelligen Eigenstrahlung der Erde (Oberflächentemperatur) in einer aufeinanderfolgenden Nacht-/Tagsituation. Andererseits sind die Überfliegungszeiten des Satelliten nicht beeinflussbar und in diesem Falle für den Berliner Raum als nicht optimal einzuschätzen (vgl. Datengrundlage).

Die Interpretation der IR-Thermalbilder erlaubt es, einzelnen Oberflächenelementen und Raumeinheiten über die spezielle erfaßte Situation hinaus qualitativ allgemeine thermische Eigenschaften zuzuordnen. Diese Umsetzung setzt jedoch großes klimatisches Fachwissen und die Nutzung weiterer Datengrundlagen wie Nutzungs- und Reliefkarten voraus, da die Ausprägung der Oberflächentemperatur verschiedener Nutzungsstrukturen im Rasterbild stets das Ergebnis komplexer physikalischer Prozesse ist, an denen verschiedene horizontale und vertikale Wärmeflüsse und Energieumsätze (Verdunstung, Kondensation) beteiligt sind. Unter Einbeziehung weiterer klimatologischer Parameter wie Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit können Oberflächentemperaturkarten zusätzlich als Unterstützung für die Bestimmung von **Klimafunktionsräumen** herangezogen werden (vgl. Karte 04.07).

Datengrundlage

Seit Anfang der 70er Jahre werden von den Raumfahrtagenturen **Erderkundungssatelliten** betrieben. Der Beobachtungssatellit **Landsat-5** der USA, in dem sich das multispektrale Aufnahmesystem "Thematic Mapper" (TM) befindet, umkreist die Erde in einer annähernd polaren Umlaufbahn in 705 km Höhe. Bei jedem der etwa 1 1/2 Stunden dauernden Erdumläufe nimmt der Satellit auf der Tagseite der Erde einen 185 km breiten Streifen auf. Innerhalb von 16 Tagen wird die gesamte Erdoberfläche einmal erfaßt; der Bereich des Verflechtungsraumes Berlin wird in etwa 20 Sekunden überflogen. Die digitalen Daten werden durch Funk zur Erde übermittelt und auf Magnetband gespeichert. Die von dem Satelliten aufgenommenen Bildstreifen des Thermalkanals bestehen aus Zeilen von je etwa 1 500 einzelnen Bildpunkten (pixel), die am Boden jeweils eine Fläche von 120 m x 120 m abdecken. Tag- und Nacht-Flugrichtung sind nicht identisch, so daß sich im späteren Kartenbild unterschiedliche Ausschnitte ergeben. Aufnahmen zur Nachtzeit des

Untersuchungsgebietes müssen vorab gesondert über die Bodenstation der europäischen Weltraumorganisation ESA in Italien bestellt werden.

Die insgesamt 7 Spektralkanäle von Landsat-TM reichen von einer Wellenlänge von 0,45 μm (blaugrünes Licht) bis zu 12,5 μm (Wärme-Infrarot).

Zur Darstellung der Oberflächentemperaturen wird der **langwellige** Wellenlängenbereich zwischen 10,4 bis 12,5 μm aufgenommen. Dieser Bereich der langwelligen Eigenstrahlung der Erdoberflächenelemente kann verhältnismäßig ungestört von den in der Atmosphäre vorhandenen Gasen die atmosphärischen Schichten passieren und wird daher auch als "Infrarotfenster" bezeichnet.

Die Auswahl der zwei Aufnahmen war gekoppelt an die (nicht zu beeinflussenden) Überflugzeiten des Berliner Gebietes jeweils am frühen **Abend** und **Vormittag** des darauffolgenden Tages sowie die meteorologischen Anforderungen. Um das Eigenverhalten der Oberflächenstrukturen möglichst ausgeprägt zu erfassen, darf keine Beeinflussung des Untersuchungsgebietes durch Bewölkung, vorherigen Niederschlag oder zu hohe Windgeschwindigkeiten vorhanden sein. Unter Berücksichtigung dieser Bedingungen konnten für das Sommerhalbjahr 1991 nur die Szenen vom **14.09., 21.45** Uhr MEZ (Aufnahme 49-222) und vom darauffolgenden **15.09., 10.30** Uhr MEZ (193-23) herangezogen werden. Die meteorologischen Bedingungen an der Station Dahlem der Freien Universität waren:

- 14.09., 22.00 Uhr MEZ: Bewölkung: 0/8, Windgeschwindigkeit: 1,0 m/s, Lufttemperatur in 2 m Höhe: 13 °C
- 15.09., 10.00 Uhr MEZ: Bewölkung: 1/8, Windgeschwindigkeit: 2,5 m/s, Lufttemperatur in 2 m Höhe: 23 °C

Die windschwache Hochdruckwetterlage vor und zum Zeitpunkt der Überfliegungen zeichnete sich durch eine Fortsetzung extremer Trockenheit mit Sonnenscheindauern im Bereich des astronomisch möglichen aus und war in dieser Hinsicht sehr gut zur Erfassung geeignet.

Zeitgleich wurden im Rahmen des parallel laufenden Klima-Gutachtens der TU-Berlin (Karten 04.02 - 04.05 und 04.07) Meßfahrten auf ausgesuchten Routen durchgeführt (Messung von Lufttemperatur, Wind und Dampfdruck in 2 m Höhe) sowie die Oberflächentemperaturen homogener Flächenstrukturen (Gewässer, großflächige Parkplätze) analog ermittelt. Es bestand somit die Möglichkeit, einerseits einen **Vergleich berechneter und gemessener Oberflächentemperaturen** durchzuführen, andererseits wurde die Einbindung der Oberflächentemperaturkarten in die Entwicklung der Klimafunktionskarte (Karte 04.07) durch die Parallelmessungen der Klimaparameter in 2 m Höhe erleichtert.

Methode

Bei den IR-Thermalaufnahmen wird die Oberflächentemperatur nicht direkt gemessen, sondern über die von den zu erfassenden Strukturen ausgehende langwellige Strahlung berechnet; erfaßt wird die sogenannte **Strahlungstemperatur**. Dabei handelt es sich um einen Energietransport mittels elektromagnetischer Wellen, wobei die Strahlung der Fluß der elektromagnetischen Wellen pro Fläche und Zeit ist. **Strahlung** und **Temperatur** eines Körpers unmittelbar an seiner Oberfläche stehen in einem funktionalen Zusammenhang, ausgedrückt durch das Gesetz von Stefan-Boltzmann. Dieser Zusammenhang besteht, wenn die Oberflächen annähernd ihr volles Emissionsvermögen (Emissionswert = 1) erreichen. Dies ist für alle wichtigen Oberflächenelemente innerhalb des erfaßten Wellenlängenbereich von 10,4 bis 12,5 μm gegeben, so daß der Einfluß der Atmosphäre auf das Emissionsverhalten vergleichsweise gering bleibt. Die Differenz zwischen der vom Satelliten erfaßten Strahlungstemperatur und der berechneten Oberflächentemperatur ist somit in der Regel vernachlässigbar. Nur Metalloberflächen, wie sie z.B. bei Flachdächern Verwendung finden, weichen mit Emissionswerten von 0,1 beträchtlich ab und müssen daher auch bei der Interpretation eine Sonderstellung einnehmen.

Von größerer Bedeutung ist dagegen der Grad der **räumlichen Auflösung** der Bildelemente in Pixel von 120 m x 120 m. Diese werden zwar vor Übergabe an den Bearbeiter durch die Bodenstation der ESA in Pixel von 30 m x 30 m umgerechnet. Doch bedeutet die Ausgangsgröße in vielen Fällen die Erfassung von **Mischsignaturen**, die z.B. die Bestimmung von Straßenzügen, kleineren Stadtplätzen oder unterschiedlichen Vegetationsstrukturen erschwert. Für jedes etwa 14 000 m² große Raster liegt somit zunächst nur die über alle im Raster enthaltenen Flächenstrukturen integrierte mittlere **Strahlungstemperatur** vor.

Die digitale Bearbeitung des Ausgangsmaterials erfolgte mit dem Bildverarbeitungssystem ERDAS. Zunächst war für die geplante Überlagerung beider Szenen zu einer **Differenzkarte** eine geometrische Entzerrung notwendig. Aufgrund der geringen Auflösung der Ausgangspixel und dem damit verbundenen hohen Anteil an Mischsignaturen eigneten sich vorrangig die Gewässer als Paßpunkte, da sie zumeist größere homogene Flächen bilden und außerdem durch den Temperaturunterschied zur Umgebung gut zu erkennen sind.

Die Umrechnung der vom Satelliten gemessenen Strahlungsmengen in **Temperaturwerte** ergab zunächst insgesamt 53 Grauwertstufen, die jeweils ein Temperaturintervall von etwa 0,5 °C repräsentierten. Damit lag der Minimum-Wert bei 4,3 °C (Nachtszene), während der Maximum-Wert 28,9 °C (Tagszene) erreichte. Die Temperaturabweichungen ausgewählter Strukturen zu dem zeitgleich durchgeführten Bodenmeßprogramm führten zu einer Klassifizierung der Temperatur in Schritten von je 1 °C. Um die Datenmenge übersichtlicher zu gestalten, wurden ohne großen Informationsverlust die Minima und Maxima in den offenen Klassen ≤ 8 und > 26 °C zusammengefaßt.

Für die Differenzkarte wurde eine zusammenfassende qualitative Klassifizierung der Temperaturdifferenzen in 5 Stufen von "niedrig" bis "hoch" gewählt, um damit auch den nicht optimalen Erfassungszeitpunkten Rechnung zu tragen. Optimale Überfliegszeitpunkte würden vor allem im Innenstadtbereich zu stärkeren Differenzierungen entsprechend dem jeweiligen Ausstrahlungsverhalten der Flächen am Tage und in der Nacht führen. Besonders die innerstädtischen Grünflächen würden sich dann als stärker abkühlende Flächen intensiv gegenüber der dichten Bebauung und den Industriegebieten mit hohem Wärmepotential in den Baumaterialien abheben.

Aussagen zum Temperaturniveau, auf dem sich die Differenzen bewegen, d.h. ob es sich um relativ hohe oder eher niedrige Oberflächentemperaturen handelt, sind in der Karte nicht enthalten. Hinweise hierzu gibt Abbildung 2.

Als Grundlage für die Interpretation und vergleichende Analyse der Tag- und Nachtsituation soll abschließend nochmals auf die von der beschriebenen Aufnahmetechnik und den Erfassungszeitpunkten bestimmten **Möglichkeiten und Grenzen** hingewiesen werden:

- Kleinteilig differenzierte horizontale und vertikale Strukturen (Innenhöfe, Straßenbereiche, Stadtplätze) können nur als Mischpixel erfaßt werden.
- Die Überfliegszeitpunkte Morgen und früher Abend erfassen nicht die Zeitpunkte größter Erwärmung bzw. größter Abkühlung. Vielmehr spielen die materialabhängigen Wärmeleit- und Wärmespeichervermögen eine besondere Rolle. So besitzt - besonders bei windschwachen Strahlungswetterlagen - der trockene, an Luftporen reiche Sandboden der Äcker und abgestorbenen Brachflächen eine schlechte Wärmeleitung und erzeugt damit eine rasche vormittägliche Erwärmung bzw. abendliche Abkühlung im Kartenbild. Umgekehrt führen die gut wärmespeichernden Eigenschaften der Baumaterialien Beton, Asphalt und Stein zu einer verlangsamten Erwärmung und Abkühlung und somit zu einer nur eingeschränkten Wiedergabe der "Wärmeinsel Stadt".
- In Hinsicht auf die Freiflächen sind auch die durch den jahreszeitlichen Wechsel hervorgerufenen Veränderungen von Bedeutung. Insbesondere bei Ackerflächen und Magerrasen werden durch die Erntezeitpunkte bzw. das weitgehende oberirdische Absterben der Bestände z.T. entscheidende Modifikationen im Temperaturverhalten erzeugt.

Kartenbeschreibung

Karte 04.06.1: Oberflächentemperaturen am Abend

Die Überfliegung fand zum Zeitpunkt fortschreitender Abkühlung statt, die in Abhängigkeit vom Thermalverhalten der einzelnen Strukturen unterschiedlich weit erfolgt war. Der erste optische Eindruck der abendlichen Überfliegung wird von den kältesten Standorten im blau-lila Bereich bestimmt. Bis auf einzelne Standorte im inneren Stadtgebiet liegen diese Flächen ausschließlich im Stadtrandbereich und außerhalb Berlins. Dabei handelt es sich vor allem um die für die Berliner Umgebung typischen weitläufigen **Äcker** und (z.T. ehemaligen) **Rieselfelder**, die sich beinahe wie ein Kranz um die Stadt legen und im Westen (Karolinenhöhe) und Nordosten (Lübars - Blankenfelde - Wartenberg) auch noch innerhalb der Stadt liegen. Kleinere, sehr kalte und deutlich abgegrenzte Flächen stellen z.B. die Äcker des Johannisstiftes in Spandau, der Jagen 94 im Grunewald, die Ruderafläche südöstlich des Müggelsees, aber auch die Brachflächen der Flughäfen dar. Westlich

des Stadtgebietes sind zu diesen stark abkühlenden Bereichen auch die Gebiete der Döberitzer Heide (und hier besonders die Senken) zu zählen. Ihr thermisches Verhalten wird - im Gegensatz zu den Waldgebieten - zumeist unwesentlich von Reliefeinflüssen verändert.

Ausschlaggebend für die genannten Flächen ist ihre Größe von mindestens mehreren Hektar Fläche sowie ihr hoher und schneller Energieumsatz im Bereich der Grenzschicht Boden/Luft. Es findet kaum oder keine Beeinflussung durch benachbarte Strukturen statt. Die **trockenen** Böden lassen nur eine geringe Wärmeleitung zu. Diese isolierende Wirkung zeigt sich am deutlichsten bei Sandböden mit besonders hohem Luftquantum. Moorstandorte weisen demgegenüber ähnlich der wärmespeichernden Wirkung der großen **Wasserflächen** eine geringere Abkühlungsrate auf; ein ähnliches Verhalten ist auch für die überstauten Bereiche in Betrieb befindlicher Rieselfelder zu erwarten.

Die genannten Standorte stellen einerseits effiziente "Kaltluftproduktionsflächen" dar, sind andererseits durch die nachts sich entwickelnde Luftstagnation aber auch besonders immissionsgefährdet. Inwieweit ihre Ausgleichswirkung für den klimatisch belasteten Bereich von Berlin wirksam werden kann, hängt somit vom Emittenteneinfluß, aber auch der räumlichen Beziehung zum Belastungsgebiet ab.

Gesondert betrachtet werden müssen die vereinzelt vorkommenden großflächigen **Metall-Flachdachkomplexe**, so z.B. an der Kanal- und Gradenstraße in Neukölln, im Bereich Eichbornstraße in Reinickendorf oder am Messegelände. Blanke Metallflächen mit ihrem stark reduzierten Emissionswert unter 0,1 nehmen - wie bereits erwähnt - eine Sonderstellung ein, so daß sich aus der im Thermalbild erfaßten Strahlungstemperatur nicht die "wahre" Oberflächentemperatur berechnen läßt (vgl. Methode). Sie erscheinen in der Karte zu kalt. Alle übrigen Flachdachkomplexe bieten mit ihrer weitgehend horizontalen Ausrichtung sehr effektive Ein- und Ausstrahlungsbedingungen und erreichen dementsprechend sehr hohe tägliche Temperaturmaxima und nächtliche -minima.

Grundsätzlich ähnlich wie die im Außenbereich liegenden Grünland- und Ackerflächen läßt sich das thermische Verhalten auch bei den großen innerstädtischen **Kleingärten** und **von Wiesen geprägten Parkanlagen** einstufen. Jedoch ist hier die Beeinflussung durch die jeweilige Lage zum bzw. im Stadtgebiet von Bedeutung. Beispiele für offen strukturierte, vor allem durch Rasen und kleinkronige Bäume bestimmte Flächen, sind die Kolonien am Südgelände, südlich des Hohenzollernkanals, im Bereich des Britzer Gartens oder die Wiesenflächen am Wasserwerk Johannisthal.

Grünbereiche mit größerem Anteil an **Baumbestand** zeigen demgegenüber ein thermisches Verhalten, wie es in den Waldgebieten, jedoch auch schon bei entsprechenden Parkanlagen im Stadtgebiet erkennbar ist. Am Beispiel des etwa 220 ha **Großen Tiergartens** soll dies näher erläutert werden: Als Parkanlage im Zentrum der Stadt ist der Große Tiergarten dem Einfluß der umgebenden dichten Bebauung ausgesetzt. Deutlich wird dies direkt im Thermalbild z.B. an dem "Wärmekeil" westlich des Brandenburger Tores. Darüberhinaus kann davon ausgegangen werden, daß - bei windschwachen Wetterlagen weniger als bei strömungsreichen - die Ausstrahlungsverluste besonders der baumbestandenen Flächen durch die warme Umgebungsluft eingeschränkt werden. Über Wiesenflächen wird relativ schnell eine der Oberfläche aufliegende Kaltluftschicht aufgebaut, deren Mächtigkeit im Laufe der Nacht zunimmt. Bei weitgehend geschlossenen baumbestandenen Flächen erfaßt die Thermalaufnahme dagegen nicht den Bestandesboden, sondern die Ausstrahlung im Bereich des Kronenraumes. In den Abendstunden verhindert zunächst die im Kronen- und Stammbereich gespeicherte Wärme ein schnelles Abkühlen. Im weiteren Verlauf wird zusätzlich aus der Umgebung Warmluft zugeführt, an den Blattoberflächen abgekühlt, in den Stammraum abgeleitet und durch nachströmende Warmluft aus dem Stammraum, aber auch aus der Umgebung oberhalb des Kronenbereiches ergänzt, die wiederum den abstrahlenden Blattoberflächen Wärme zuführt. Dieser Prozess wird erst dann beendet, wenn sich vom Bestandesboden her eine Kaltluftschicht aufgebaut hat, die auch den Kronenbereich erfaßt. Der zum Zeitpunkt der größten Abkühlung zu erwartende Temperaturgradient zwischen den Wiesen- und Baumflächen des Großen Tiergartens hängt daher sehr stark von der Bestandeshöhe, -art und -dichte der Bäume ab.

Die **Waldflächen** folgen grundsätzlich dem oben genannten Abkühlungsschema. In bewegtem Gelände verzögert sich die Abkühlung aber zusätzlich durch Kaltluftabfluß bzw. Kaltluftsammlung in den Senken. Die hohen Bestandestemperaturen in **Kuppenlagen** (Havel- und Müggelberge, Schäferberg) lassen sich dadurch erklären, daß hier der Aufbau einer Kaltluftschicht vom Boden her durch den dem Gefälle folgenden Kaltluftabfluß verhindert wird. Umgekehrt konzentriert sich die produzierte Kaltluft in vorhandenen Senkenbereichen.

Im Grenzbereich zu den **Gewässern** überlagern sich diese Einflüsse mit dem dortigen durch das ausgeprägte Wärmespeichervermögen von Wasser gegebenen hohen Temperaturniveau. Die Gewässer wirken sehr ausgeglichen im Tag-Nachrhythmus; der Temperaturverlauf ist abhängig von

der Gewässertiefe und damit dem "Nachschub" an gespeicherter Wärme sowie direkten anthropogenen Einflüssen. Die Rückleitungen erwärmten Kühlwassers am Heizkraftwerk Reuter und am Kraftwerk Oberhavel sind deutlich im Thermalbild zu erkennen.

Der Temperaturverlauf in den **bebauten Bereichen** ist im wesentlichen eine Funktion der Bebauungsstrukturen. Hoher Anteil an wärmespeichernden Materialien wie Beton, Stein, Asphalt führt erwartungsgemäß in weiten Bereichen der Innenstadt, in Kerngebietslagen ebenso wie in Industriegebieten, zu den höchsten Temperaturwerten nach den Feucht- und Gewässerstandorten. Sie können daher als eine **flächenhafte Wärmequelle** angesprochen werden, die den größten Einfluß auf die Ausbildung des sogenannten "Wärmeinsel-Effektes" ausübt.

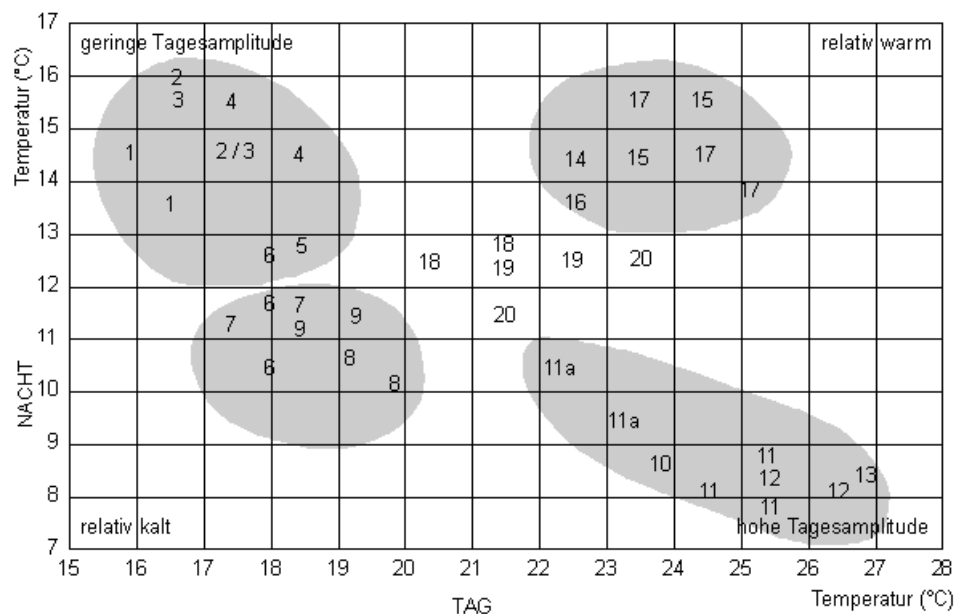
Beeinflusst wird die Intensität der örtlichen Abkühlung einerseits von dem Anteil der gut wärmespeichernden Baumassen im Gebäude-, Straßen- und Stadtplatzbereich sowie andererseits von den schneller und stärker wärmeabstrahlenden Flächen der Gebäudedächer und Grünbereiche. Somit ergeben sich auch für die verdichteten Innenstadtlagen noch Unterschiede zwischen den engbebauten Blockstrukturen mit hohem Anteil schlecht wärmeleitender Dachflächen und unbesonnener Innenhöfe und den mit mehr Platz- und Abstandsflächen ausgestatteten Innenstadtgebieten. Eine Einschätzung im Hinblick auf die klimatische Gesamtsituation dieser bebauten Bereiche ist ebensowenig wie in vergleichbaren Industriegebieten abzuleiten, da im Einzelfalle immer streng in die im Thermalbild erfaßten Temperaturniveaus zu unterscheiden ist.

Ähnliche Phänomene hoher Abkühlungsraten auf anthropogen stark beeinflussten Standorten sind überall dort zu erwarten, wo kein fester Anschluß an den Untergrund vorhanden ist, wie etwa bei den Schotterflächen der **Bahntrassen** und angrenzender Flächen.

Karte 04.06.2: Oberflächentemperaturen am Morgen

Die Erwärmung der Oberflächen durch die der Jahreszeit entsprechend erst gegen 6.00 Uhr MEZ aufgegangene Sonne hat materialabhängig zum Zeitpunkt der Überfliegung gegen 10.30 Uhr zu einem quasi nur als Zwischenstand differenzierten Thermalbild geführt. In vielen Fällen verhalten sich die Einzelflächen **spiegelbildlich zur Nachtaufnahme** und sollen daher hier nur kurz erwähnt werden.

Analog zur Nachtaufnahme stellen die **offenen Flächen** der abgeernteten Äcker und die Wiesen sowie vergleichbare Nutzungen die auffälligsten Standorte dar. Ihre rasche Erwärmung ist auf den hohen Wärmeumsatz an der Oberfläche infolge verminderter Wärmeleitung in den Untergrund und geringen Wärmespeichervermögens zurückzuführen. Das vergleichsweise hohe Luftvolumen der trockenen Böden isoliert die Bodenoberfläche von den tieferen Bodenschichten, der Wärmeübergang zwischen den einzelnen Bodenbestandteilen wird stark erschwert. Zwischen der Tag- und Nachtüberfliegung ergeben sich dadurch Temperaturdifferenzen von mehr als 20 °C.



- | | | | |
|-----------------|--|---------------------------------|------------------------|
| 1 = Müggelsee | 6 = Forststandorte Grunewald, Tegel, Spandau | 11 = landwirtschaftliche Fläche | 16 = dichte Bebauung |
| 2 = Havel | 7 = innerstädtische Parkanlagen | 12 = Rieselfelder | 17 = Industrie/Gewerbe |
| 3 = Tegeler See | 8 = Kleingärten | 13 = Flugplätze | 18 = lockere Bebauung |

4 = Rummelsburger See
5 = Spree

9 = Einzelhausbebauung
10 = Dahlemer Feld

14 = Autobahnkreuze
15 = Kerngebiete

19 = Großsiedlungen
20 = Bahnanlagen

Abb. 2: Oberflächentemperaturverhalten ausgewählter Flächentypen und Einzelstandorte aus Abend- und Morgenaufnahme des 14./15.9.1991 (Horbert, Institut für Ökologie, TU-Berlin)

Die **Gewässer** dagegen besitzen lediglich einen flachen Oberflächentemperatur-Gradienten, der selbst bei geringen Wassertiefen und damit erhöhtem Wärmeumsatz zwischen Tag und Nacht nur 2 - 3 °C beträgt. Zur hohen Wärmespeicherkapazität tritt am Tage wie auch bei anderen Feuchtstandorten der temperaturmindernde Effekt der hohen Verdunstungsraten. Sie zählen damit zu den kühleren Standorten. Ebenfalls sehr kalt erscheinen die großen Oberflächen der Flachdachkomplexe in Industrie- und Gewerbegebieten (vgl. Abendaufnahme).

Für **baumbestandene Parkanlagen** und die **Wälder** gilt zum Zeitpunkt der Erfassung, daß der im Laufe der nächtlichen Abkühlungsphase erreichte Grad der Abkühlung bis in den Kronenbereich einen zunächst weiter vorhaltenden Puffer darstellt, der durch die einsetzende Evaporation der Blattmasse (Verdunstungskälte) noch verstärkt wird. Die Wälder erscheinen darüberhinaus homogener als in der Abendaufnahme, da der Effekt des Kaltluftabflusses bei Kuppenlagen nunmehr keine Rolle spielt.

Der **dichtbebaute** Bereich kann sich aufgrund der geschilderten physikalischen Gesetzmäßigkeiten am Vormittag noch nicht in der erwarteten Weise als zentrale Wärmeinsel darstellen; hier wäre zu einem späteren Zeitpunkt mit verstärkter Abstrahlung der gespeicherten Wärme ein Annähern an die Werte der Ackerflächen und Wiesen zu erwarten.

Karte 04.06.3: Oberflächentemperaturdifferenzen Abend - Morgen

Wie bereits betont, wurde für die Differenzenkarte lediglich eine qualitative Abstufung des Temperaturgradienten gewählt. Aufgrund der Aufnahmezeitpunkte verbleiben große Bereiche des Erfassungsgebietes im Bereich mittlerer Temperaturgradienten. Nur die Gewässer mit ihren geringen Temperaturschwankungen im Tag-Nacht-Rhythmus sowie umgekehrt die Flächennutzungen mit maximalen Gradienten (unbewachsene oder wiesenartige Strukturen) werden repräsentativ wiedergeben.

Für eine Bewertung der thermischen Wirksamkeit der Flächenstrukturen ist es sinnvoll, neben der qualitativen Darstellung der Temperaturdifferenzen im Tag-Nacht-Vergleich auch eine Auswertung hinsichtlich des jeweiligen **Temperaturniveaus**, auf dem die Schwankungen stattfinden, einzubeziehen. Abbildung 2 bezieht sich auf ausgewählte Flächentypen und Einzelstandorte und ordnet diese in eine **Tag-Nacht-Temperaturmatrix** ein.

Hier sind Flächen(-typen) zu erkennen, die eine relativ hohe bzw. geringe Tagesamplitude aufweisen. Daneben zeichnen sich Bereiche ab, die grundsätzlich recht kühl bzw. recht warm einzustufen sind. Das ist für die Beeinflussung der über den Oberflächen lagernden Luftmassen von großer Bedeutung, wobei sich durch den horizontalen Luftaustausch Verschiebungen der Lufttemperatur ergeben können. Unterschiedliche Zuordnungen eines Flächentyps charakterisieren die **Streuung der Tages- und Nachtoberflächentemperaturen**. Die niedrigen Tages- und Nachttemperaturen der Wälder, Parkanlagen, Kleingärten und locker bebauten Stadtrandsiedlungen stehen im Gegensatz zu den ganztägig hohen Oberflächentemperaturen der dicht bebauten Innenstadt und der Verkehrs- und Industrieflächen. Durch die hohe Wärmekapazität und Wärmeleitung weisen die Gewässer mit niedrigen Tages- und hohen Nachttemperaturen eine starke Dämpfung der täglichen Amplitude auf. Dies überträgt sich auch noch auf die unmittelbare Umgebung der Uferbereiche. Im Gegensatz hierzu stehen die landwirtschaftlich genutzten Flächen, Rieselfelder und auch noch die Bahnanlagen, die sich am Tage stark erwärmen, in den Nachtstunden aber ebenso stark abkühlen.

Hierdurch treten an diesen Standorten die größten Tagesamplituden auf.

Literatur

- [1] **Deutsche Meteorologische Gesellschaft e.V. 1989:**
Fachausschuß BIOMET in: Mitteilungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, 3, S. 51 - 53, o.O..

- [2] **Freie Universität Berlin, Institut für Geologie, Geophysik und Geoinformatik 1992:**
Abschlußbericht zur digitalen Bearbeitung der Thermaldaten für das Berliner Stadtgebiet, Gutachten im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin, unveröffentlicht.
- [3] **Gossmann, H. 1984:**
Satelliten Thermalbilder. Ein neues Hilfsmittel für die Umweltforschung? in: Fernerkundung in Raumordnung und Städtebau, 16, Bonn.
- [4] **Haberäcker, P. 1985:**
Digitale Bildverarbeitung, Grundlagen und Anwendungen, Hanser-Verlag, München.
- [5] **Landeshauptstadt München (Umweltschutzreferat) (Hrsg.) 1990:**
Umweltatlas München, Band II, Verlag Löhr & Partner GmbH, München.
- [6] **Mählenhoff, S. 1989:**
Ökologische Folgen der Bodenversiegelung, in: Mitteilungen der Niedersächsischen Naturschutzakademie, 4/91, S. 6 - 16.
- [7] **Nachbarschaftsverband Stuttgart 1992:**
Klimauntersuchung für den Nachbarschaftsverband Stuttgart und angrenzende Teile der Region Stuttgart (Klimaatlas), Stuttgart.
- [8] **Schirmer, H. et al. 1987:**
Meyers Kleines Lexikon, Meteorologie, Meyers Lexikon Verlag, Mannheim.
- [9] **Schott, J.R., Volchock, W.J. 1985:**
Thematic mapper infrared calibration. - Photogramm. Eng. remote Sens., 51, 9, S. 1351 - 1357, Falls Church.
- [10] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1993a:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.02 Langjähriges Mittel der Lufttemperatur (1961 - 1990), 1:50 000.
- [11] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1993b:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.04 Temperatur- und Feuchteverhältnisse in mäßig austauscharmen Strahlungsnächten, 1:50 000.
- [12] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1993c:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.05 Stadtklimatische Zonen, 1:50 000.
- [13] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1993d:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.07 Klimatische Funktionsräume, 1:50 000.
- [14] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1994:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.03 Bodennahe Windverhältnisse, 1:50 000.
- [15] **Stadtdirektor der Stadt Münster 1992:**
Stadtklima Münster - Werkstattberichte zum Umweltschutz, 1, Münster.
- [16] **Zweckverband Raum Kassel 1991:**
Stadtklimatische Untersuchung für das Gebiet des Zweckverbandes