

04.06 Oberflächentemperatur bei Tag und Nacht (Ausgabe 2001)

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 Wärmespeichervermögen der Baustoffe, die Versiegelung des Bodens, das Fehlen von Vegetation, durch einen veränderten Wasserhaushalt und die vermehrte Emission von Abgasen, Aerosolen und Abwärme."

Bewertungs- und Untersuchungsansätze

Für die Bewertung der jeweiligen Klimasituation fehlen verbindliche Grenz- und Richtwerte analog den Luftgüte-Werten des Bundes-Immissionsschutz-Gesetzes. Empfehlenden Charakter besitzt eine Richtlinie der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI (vgl. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 3787 Blatt 2 1998). Diese hat das Ziel, Bewertungsverfahren der Human-Biometeorologie als Standard für die auf Menschen bezogene Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene (Bioklima) bei der Stadt- und Regionalplanung bereitzustellen. Die Human-Biometeorologie beschäftigt sich mit den Wirkungen von Wetter, Witterung, Klima und Lufthygiene auf den menschlichen Organismus. Im vorliegenden ersten Teil dieser Richtlinie werden die human-biometeorologischen Wirkungskomplexe zusammengestellt und die empfohlenen Bewertungsmethoden für den Bereich "Klima" erläutert. Insbesondere steht hierbei der thermische Wirkungskomplex im Vordergrund, der in der Stadt- und Regionalplanung mit dem Ziel eingesetzt werden soll, gesunde Wohn- und Arbeitsbedingungen zu sichern. Mit seiner Hilfe können planerische Fragestellungen aus bioklimatologischer Sicht behandelt werden. 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).

Indikatoren

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 (Nachbarschaftsverband Stuttgart 1992)	
Oberflächenbeschaffenheit	Reflexionsanteil (%)
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).

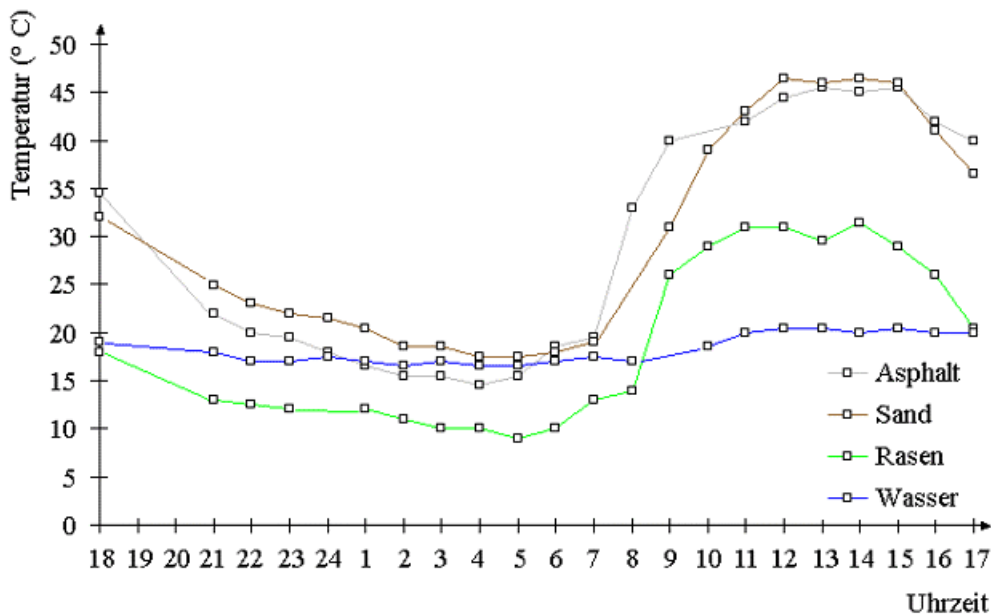


Abb. 1 : Oberflächentemperaturen verschiedener Strukturen (Kessler 1971 in: Mählenhoff 1989)

Digitale Thermalkarten

Für (städtische) Klimaanalysen liegt der wesentliche Nutzen von Thermalkarten in ihrem **flächhaften, 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

Satellitendaten

Seit Anfang der 70er Jahre werden von den Raumfahrtagenturen **Erderkundungssatelliten** betrieben. Der 1999 neu eingesetzte Beobachtungssatellit **Landsat-7** der USA, in dem sich das multispektrale Aufnahmesystem "ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)" (TM) befindet, umkreist die Erde in einer annähernd polaren Umlaufbahn in 705 km Höhe (vertiefende Informationen über www.nasa.gov). 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. Seit April 1999 wird das verbesserte Folgeinstrument Landsat 7 eingesetzt. Die von dem Satelliten aufgenommenen Bildstreifen des Thermalkanals bestehen aus Zeilen von je etwa 3 100 einzelnen Bildpunkten (pixel), die am Boden jeweils eine Fläche von 60 m x 60 m abdecken. Dies bedeutet eine 4-fach höhere Auflösung gegenüber der Befliegung mit Landsat 5 im Jahre 1991 (vgl. Karte 04.06 Ausgabe 1993). 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 (blau-grünes Licht) bis zu 12,5 µm (Wärme-Infrarot). Dabei stehen zwei Spektralkanäle im thermalen Infrarot zur Verfügung. Die spektrale Auslegung beider Kanäle ist gleich und entspricht Landsat 5 TM.

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 2000 nur die Szenen vom **13.08., 21.45** Uhr MEZ und vom darauffolgenden **14.08., 10.30** Uhr MEZ herangezogen werden. Die meteorologischen Bedingungen an der Station Dahlem der Freien Universität waren:

- 13.08., 22.00 Uhr MEZ: Bewölkung: 0/8, Windgeschwindigkeit: 3,0 m/s, Lufttemperatur in 2 m Höhe: 19,2 °C
- 14.08., 10.00 Uhr MEZ: Bewölkung: 1/8, Windgeschwindigkeit: 2,0 m/s, Lufttemperatur in 2 m Höhe: 24,4 °C

Im Vergleich zur vorhergehenden Satellitenbild-Aufnahme aus dem Jahre 1991, die in eine Phase extremer Trockenheit fiel, waren die Bedingungen im Vorfeld dieser Aufnahme abweichend. In der ersten Hälfte des August war die Witterung in Deutschland von einem Wechsel unterschiedlicher Luftmassen und entsprechender Niederschlagsaktivitäten geprägt. Zu Beginn der zweiten Monatshälfte führte ein Hochdruckgebiet zu trockenem und zunehmend wärmerem Wetter, wobei die Temperaturen am 14.08. verbreitet mit Werten größer 30 °C ihr Monatsmaximum erreichten. Dieser Zeitpunkt fiel glücklicherweise mit der Landsat-Überfliegung zusammen.

Geometrische Korrektur

Die geometrische Korrektur der Szenen wurde mittels Paßpunktbestimmung gegenüber den Vektordaten der Bebauungsstrukturen des Informationssystems Stadt und Umwelt sowie der Zuordnung der satellitenbildsichtbaren Objekte durchgeführt. Dabei wurde auch das bei Landsat 7 nunmehr zur Verfügung stehende panchromatische Band 8 mit einer Auflösung von 15 m für die Korrektur aller weiteren benötigten Daten genutzt.

Terrestrische Meßdaten

Zeitgleich wurden vom Fachgebiet Bioklimatologie der TU-Berlin auf ausgewählten großflächigen Arealen am südlichen Stadtrand Berlins Vergleichsmessungen der Oberflächentemperatur durchgeführt sowie die Temperaturen ausgewählter Gewässer registriert. Es bestand somit die Möglichkeit, einen **Vergleich berechneter und gemessener Oberflächentemperaturen** durchzuführen.

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 Wellenlängenbereichs 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.

Auflösung

Von größerer Bedeutung ist dagegen der Grad der **räumlichen Auflösung** der Bildelemente in Pixel von 60 m x 60 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 3600 m² große Raster liegt somit zunächst nur die über alle im Raster enthaltenen Flächenstrukturen integrierte mittlere **Strahlungstemperatur** vor.

Datenverarbeitung

Die digitale Bearbeitung des Ausgangsmaterials erfolgte mit dem Bildverarbeitungssystem ERDAS. Die geometrische Korrektur der Szenen wurde mittels **Paßpunktbestimmung** bezogen auf die Vektordaten der Bebauungsstrukturen Berlins und der Zuordnung der satellitenbildsicheren Objekte durchgeführt. Diese wurden aus dem panchromatischen Datensatz vom 14.08. extrahiert, da hier die beste räumliche Auflösung der Satellitendaten (15m x 15m) vorlag. Diese Daten wurden mit Hilfe der über das ganze Stadtgebiet verteilten Paßpunkte geometrisch entzerrt.

Die **Strahlungstemperaturen** konnten aus den Grauwerten der Satellitendaten abgeleitet werden. Dazu müssen die Grauwerte zunächst in spektrale Strahldichten umgerechnet werden. Diese werden in einem nächsten Bearbeitungsschritt in die Oberflächentemperaturen der beobachteten Gebietes umgerechnet. Die in der Auswertung erhaltenen Werte in °C wurden zur Vereinfachung und Reduzierung der Datenmenge jeweils auf 1°C gerundet.

Differenzenkarte

Die Berechnung der Tag-/Nacht Temperaturdifferenzen wurde für das Szenenduo Tag und Nacht durchgeführt. Die Ergebnisse wurden ebenfalls auf 1 °C gerundet. Aussagen zum Temperaturniveau, auf dem sich die Differenzen bewegen, d.h. ob es sich um relativ hohe oder niedrige Werte handelt, können den Hinweisen in Abbildung 2 entnommen werden.

Interpretationshinweise

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 Überfliegungszeitpunkte **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 Ruderalfläche 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 Gradestraße 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. 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-Nachtrhythmus; der Temperaturverlauf ist abhängig von der Gewässertiefe und damit dem "Nachschub" an gespeicherter Wärme sowie direkten anthropogenen Einflüssen.

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.

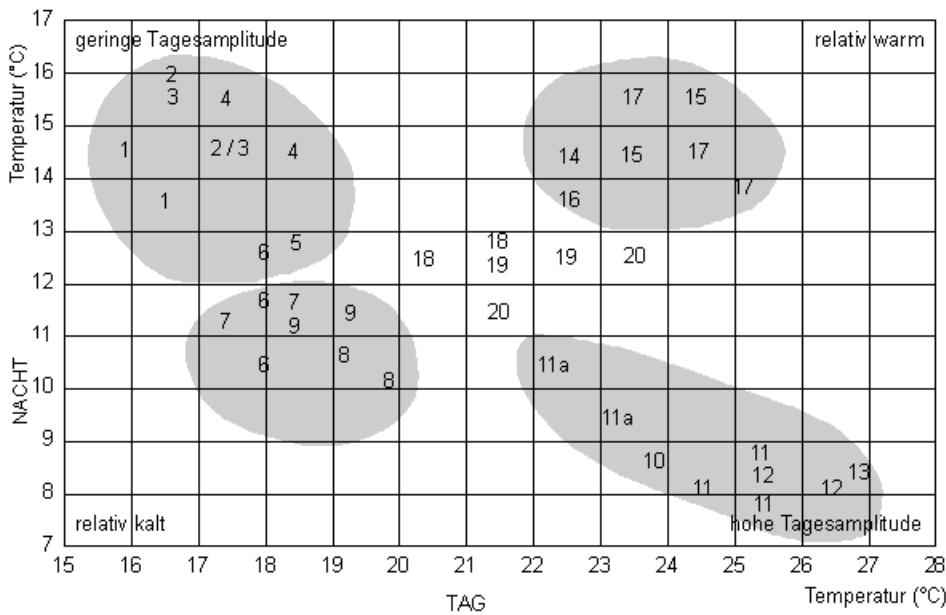
Beeinflußt wird die Intensität der örtlichen Abkühlung einerseits von dem Anteil der gut wärmespeichernden Baumassen im Gebäude-, Straßen- und Stadtplatzbereich sowie andererseits von den schneller und stärker wärmeabstrahlenden Flächen der Gebäudedächer und Grünbereiche. Somit ergeben sich auch für 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 Innenstadtbereichen. 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 | 9 = Einzelhausbebauung | 14 = Autobahnkreuze | 19 = Großsiedlungen |
| 5 = Spree | 10 = Dahlemer Feld | 15 = Kerngebiete | 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 kühlest 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 Kuppenanlagen 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

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.

Vergleich der Aufnahmezeitpunkte 1991 und 2000

Die Aufnahmetermine des Jahres 1991 (vgl. Karte 04.06 Ausgabe 1993) und 2000 liegen ca. einen Monat auseinander und die Wettersituationen waren somit nicht exakt vergleichbar. Dennoch läßt sich feststellen, daß das Temperaturniveau der jeweiligen Tag- und der zugehörigen Nachtszene sich bei diesen Terminen um ca. 6°C unterschied. Somit stellen die Tag-Nacht-Differenzen ein sehr ähnliches Bild dar und es liegt nahe, bei kleinflächigen Unterschieden der Differenzen zwischen 1991 und 2000 die Beziehung zu **Veränderungen der Landnutzung bzw. Bebauungsstrukturen** zu prüfen. Zu beiden Aufnahmezeitpunkten zeigen die Wasserflächen im Vergleich der Oberflächentemperaturen nur sehr geringe Tag-Nachtschwankungen im Bereich von ca. 1-3 Kelvin. Demgegenüber stehen die landwirtschaftlichen Nutzflächen fast aller Bearbeitungszustände, die Berliner Flughäfen oder stark versiegelte und dabei meist industriell genutzte Flächen mit Differenzen der Oberflächentemperaturen von bis zu 15 - 20 Kelvin. Die Wälder und Parks weisen flächenhaft etwas geringere Differenzwerte als die durch innerstädtische Bebauung zu charakterisierenden Bereiche auf.

Zudem fallen insbesondere in den Daten mit der höheren räumlichen Auflösung aus dem Jahr 2000 einige Bereiche mit extrem niedrigen Oberflächentemperaturen sowohl am Tag als auch in der Nacht auf:

- Borsighallen,
- Krankenhaus am Messegelände
- Industriestandort an der Gradestraße etc.

In diesen Bereichen spiegeln sich die unter Methode bereits beschriebenen Effekte besonderer Materialeigenschaften von Metalldächern wider.

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:**
Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung Teil I: Klima, VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2, Düsseldorf.
- [5] **Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Hrsg.) 1998:**
Digitale Bildverarbeitung, Grundlagen und Anwendungen, Hanser-Verlag, München.
- [6] **Landeshauptstadt München (Umweltschutzreferat) (Hrsg.) 1990:**
Umweltatlas München, Band II, Verlag Löhr & Partner GmbH, München.
- [7] **Mählenhoff, S. 1989:**
Ökologische Folgen der Bodenversiegelung, in: Mitteilungen der Niedersächsischen Naturschutzakademie, 4/91, S. 6 - 16.
- [8] **Munier, K. et al 2000:**
Aktualisierung des Umweltatlas Berlin - Ableitung der Oberflächentemperaturen für Berlin aus Landsat-Satellitendaten, unveröffentlicht im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Berlin.

- [9] **Nachbarschaftsverband Stuttgart 1992:**
Klimauntersuchung für den Nachbarschaftsverband Stuttgart und angrenzende Teile der Region Stuttgart (Klimaatlas), Stuttgart.
- [10] **Schirmer, H. et al. 1987:**
Meyers Kleines Lexikon, Meteorologie, Meyers Lexikon Verlag, Mannheim.
- [11] **Schott, J.R., Volchock, W.J. 1985:**
Thematic mapper infrared calibration. - Photogramm. Eng. remote Sens., 51, 9, S. 1351 - 1357, Falls Church.
- [12] **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.
- [13] **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.
- [14] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1993c:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.05 Stadtklimatische Zonen, 1:50 000.
- [15] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1993d:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.07 Klimatische Funktionsräume, 1:50 000.
- [16] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1994:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.03 Bodennahe Windverhältnisse, 1:50 000.
- [17] **Stadtdirektor der Stadt Münster 1992:**
Stadtklima Münster - Werkstattberichte zum Umweltschutz, 1, Münster.
- [18] **Zweckverband Raum Kassel 1991:**
Stadtklimatische Untersuchung für das Gebiet des Zweckverbandes