

Beitragsserie: Klimaänderung und Klimaschutz

Hrsg.: Prof. Dr. Detlev Möller, Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus, Lehrstuhl für Luftchemie und Luftreinhaltung, Volmerstr. 13, D-12489 Berlin (moe@btu-lc.fta-berlin.de; <http://www.luft.tu-cottbus.de>)

Stadtklima

Teil 1: Grundzüge und Ursachen*

Wilhelm Kuttler

Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, Institut für Geographie, Abt. Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie, Universitätsstraße 5, D-45141 Essen, (wiku@uni-essen.de)

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2004.03.078>

Zusammenfassung. Dieser Übersichtsartikel besteht aus zwei Teilen und widmet sich der Stadtklimatologie. In **Teil 1** werden nach kurzer Darstellung der Raum- und Zeitskalen des Stadtklimas sowie der Behandlung seiner geschichtlichen Entwicklung die Charakteristika des urbanen Klimas im Vergleich zum nicht versiegelten Umland am Beispiel mitteleuropäischer Ballungsräume vorgestellt. Anschließend werden die Voraussetzungen und Ursachen des Stadtklimas diskutiert: die Umwandlung des natürlichen Untergrundes in versiegelte Flächen, die anthropogene Wärmefreisetzung sowie die Emission von Luftverunreinigungen. Wichtige Einflussgrößen, wie das Verhalten der thermischen und hydrologischen Eigenschaften urbaner Oberflächen, die im Mikro- und Mesoskalabereich die stadtklimatisch wirksam werdenden Komponenten steuern, werden an Beispielen erläutert. Die hieraus für die Energiebilanz städtischer Oberflächen resultierenden Beträge werden für den Bodenwärmestrom (thermische Speichergröße) sowie für die sensiblen und latenten turbulenten Wärmeflussdichten quantifiziert.

Teil 2 (Phänomene und Wirkungen) behandelt die Charakteristika stadtklimatischer Phänomene, widmet sich human-biometeorologischen Problemen, greift anwendungsbezogene Aspekte auf und beleuchtet den Einfluss globaler Temperaturerhöhungen auf das Stadtklima.

Schlagwörter: Anthropogene Wärmeflussdichten; anthropogene atmosphärische Spurenstoffe; hydrologische Oberflächeneigenschaften; Klimatop; Mesoklimatologie; Messmethoden; Mikroklimatologie; thermische Oberflächeneigenschaften; urbane Oberflächen; Stadtklimaeigenschaften

Abstract

Urban Climate. Part 1: Fundamentals and Causes

This two-part review paper is attended to the urban climate. After referring to the spatial and temporal scales as well as to the historical developments in urban climate, **Part 1** introduces the methods of measuring urban climate parameters and the characteristics of the urban climate in relation to its rural surroundings. Examples are given for some central-European cities. The premises and causes of the urban climate are discussed: the conversion of natural ground cover into sealed surfaces, anthropogenic heat release and emissions of air pollutants. The importance of factors like the behaviour of thermal and hydrological properties of urban surfaces which influence urban climate in the micro- and mesoscale are described by means of some examples. Implications for the resulting energy balance of urban surfaces are quantified in terms of the sub-surface heat flux, the sensible and latent heat flux densities.

Part 2 (Main features and effects) describes the features and human-biometeorological effects of the urban climate, takes up planning aspects and discusses the impact of global warming to urban climate.

Keywords: Air pollution; anthropogenic heat flux; climate; hydrological surface parameters; measurement methods; mesoclimatology; microclimatology; thermal surface parameters; urban climate features; urban surfaces

Einleitung

Der urbane Siedlungsraum verursacht im Vergleich zu seiner nicht bebauten Umgebung klimatische und lufthygienische Veränderungen, die allgemein unter dem Begriff 'Stadtklima' zusammengefasst werden. Hierunter versteht man ein mit der Bebauung in Wechselwirkung stehendes Klima, das zusätzlich durch Abwärme und anthropogene atmosphärische Spurenstoffe modifiziert wird.

Vierorts ist der städtische Lebensraum mit Einbußen an Umweltqualität verbunden, wodurch es zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Stadtbewohner kommen kann. Der heiße Sommer 2003 hat z.B. auch die negativen Seiten des Klimas

in zahlreichen Städten Europas durch hohe und lang andauernde thermische Belastungen, die kaum durch die natürliche nächtliche Abkühlung gemindert werden konnten, deutlich vor Augen geführt. Auch wenn es sich für die mittleren Breiten hierbei klimatologisch um ein seltenes Ereignis handelt, dürften sich unter der Annahme eines globalen Temperaturanstiegs die Stadtklimaeffekte weltweit verschärfen.

Da im Verlauf des 21. Jahrhunderts mehr als 70% der Erdbevölkerung in Städten – darunter in 27 Megastädten mit jeweils 10 Mio. Einwohnern – leben wird (Birg 1996), muss davon ausgegangen werden, dass immer mehr Menschen den meist nachteiligen stadtklimatischen Auswirkungen ausgesetzt sein werden. Diese Entwicklung zu verhindern oder zumindest positiv zu beeinflussen, dazu sind Wissenschaft und Stadtplanung weltweit aufgerufen.

* Teil 2: Phänomene und Wirkungen (folgt in der UWSF-Augustausgabe)

1 Stellung des Stadtklimas innerhalb der Klimatologie und geschichtliche Aspekte

1.1 Das Stadtklima und seine Stellung in der Klimatologie

Die Stadtklimatologie ist als raumbezogene Wissenschaft der Mikro- und Mesoklimatologie zuzurechnen, jener Fachdisziplin, die sich mit der Analyse des lokalen und regionalen Klimas beschäftigt. Je nach Größe der zu untersuchenden Städte und des Umfangs der zugrunde liegenden Fragestellungen sind Prozesse innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht zu behandeln, deren horizontale und vertikale Maßstäbe mehrere Größenordnungen umfassen können. Das Spektrum stadtklimatischer Arbeiten kann beispielsweise die Bestimmung der Oberflächenenergiebilanz einer Hauswand oder Straßendecke ebenso umfassen wie die dreidimensionale quantitative und qualitative Analyse regional wirksamer Belüftungssysteme ganzer Siedlungsbereiche. **Tabelle 1** enthält eine exemplarische Aufstellung stadtklimatischer Prozesse mit entsprechenden Größenskalen. Ergänzend wurden Angaben zu den üblicherweise in der räumlichen Planung verwendeten Kartenmaßstäben hinzugefügt.

Die Stadtklimatologie ist auch Teil der Umweltmeteorologie¹, die sich mit den stofflichen und energetischen Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und der anthropogenen Lebensumwelt beschäftigt (Kuttler und Düttemeyer 2003; Mayer und Matzarakis 2003). Das generell einen Siedlungsraum charakterisierende Stadtklima setzt sich aus einer Vielzahl eigenständiger Mikroklimata zusammen, die durch die unterschiedliche urbane Flächennutzung verursacht wird und in ihrer Gesamtheit letztlich das Klima eines Siedlungsraumes bildet (Helbig 1987).

Im Vergleich zum Umland sind die stadtklimatischen Besonderheiten ganzjährig zu beobachten. Sie bilden sich je-

¹ Die Umweltmeteorologie ist als Teilgebiet der Angewandten Meteorologie aufzufassen. Die Analyse der genannten Wechselwirkungen umfasst die physikalischen und chemischen Zustände und Prozesse der Atmosphäre 'in ihrer Auswirkung auf den Menschen ebenso, wie die anthropogenen Eingriffe und deren Folgen auf die atmosphärische Umwelt. Ziel der umweltmeteorologischen Forschung ist es, Lösungswege zur Vermeidung bzw. Verbesserung von schädlichen Umwelteinflüssen aufzuzeigen. Die Umweltmeteorologie bedient sich dabei einer über den interdisziplinären Ansatz hinausgehenden transdisziplinären Arbeitsweise' (Kuttler und Düttemeyer 2003, S. 15).

doch am ausgeprägtesten während autochthoner, das heißt windschwacher sonnenscheinreicher Wetterlagen heraus, jenen als 'eigenbürtig' zu bezeichnenden Witterungsabschnitten, die vornehmlich bei antizyklonalen Großwetterlagen entstehen und durch ausgeprägte Tagesgänge der meisten meteorologischen Elemente gekennzeichnet sind. Dadurch ist das jeweilige Auftreten der stärksten stadtklimatischen Unterschiede im Allgemeinen an die Dauer weniger Tage gebunden. In Mitteleuropa weisen durchschnittlich etwa 20% der Tage und 30% der Nächte eines Jahres die Charakteristika von Strahlungswetter auf (Wilmers 1976). Zu der erwähnten räumlichen Abgrenzung ergibt sich somit auch eine zeitliche Abhängigkeit des Stadtklimas, die an die Dauer der meist nach Tagen zu bemessenden Witterungsabschnitten gebunden ist.

Obwohl die stadtklimatischen Auswirkungen in erster Linie die Mikro- bis Mesoskala betreffen, wird durch die Freisetzung strahlungsbeeinflussender und langlebiger Luftinhaltsstoffe (z.B. CO₂, CH₄) neben dem regionalen auch das globale Klima beeinträchtigt (Houghton et al. 2001). In welchem Maße der globale Temperaturanstieg auf das urbane Klima zurückwirkt, wird in Teil 2 behandelt.

Stadtklimauntersuchungen sind entweder Bestandteil der Grundlagenforschung oder anwendungsorientiert ausgerichtet. Der planungsrelevante Aspekt hat in den vergangenen Jahrzehnten auch dadurch an Bedeutung gewonnen, dass die Faktoren 'Klima' und 'Luft' in zahlreiche gesetzliche Regelwerke Eingang fanden.

1.2 Geschichtliche Aspekte

Die Anfänge der Stadtklimatologie lassen sich zeitlich relativ weit – sogar bis ins Altertum – zurückverfolgen. Erste Arbeiten auf diesem Gebiet werden Vitruvius (75 v.Chr. – 26 v.Chr.; 'Stadtplanung und Klimabedingungen') und Horaz (ca. 24 v.Chr.; 'Luftverschmutzung in Rom') zugeschrieben (Zusammenstellung bei Yoshino 1990/91, Möller 2003). Dabei wurden insbesondere Probleme der Stadtplanung in Zusammenhang mit den klimatischen und lufthygienischen Einflüssen behandelt, und zwar ausgehend von Untersuchungen in der Stadt Rom, später – im Mittelalter – in der vor allem unter der Erhöhten Belastung mit anthropogenen atmosphärischen Spurenstoffen in erheblichem Maße leiden-

Tabelle 1: Skaleneinteilung atmosphärischer Phänomene in der Mikro- und Meso-Skala sowie zugeordnete Größen der räumlichen Planung (nach Hörschele 1984; hier in der Zusammenstellung von Matzarakis 2001, ergänzt)

Horizontale Erstreckung	Atmosphärische Phänomene	Skalenbezeichnung	Planungsebene	Üblicher Kartenmaßstab
200 km	Gebirgseinflüsse, Land-/Seewind, Wolkencluster	Meso-Skala β	Landesplanung	1:500 000
20 km	urbane Wärmeinsel, Gewitterzellen	Meso-Skala γ	Regionalplanung	1:50 000
2 km	Kühlturmschwaden, Konvektion, Tornados	Mikro-Skala α	Standort-, Flächennutzungsplanung	1:10 000
200 m	Staubtromben, Thermik, Bauwerkseffekte	Mikro-Skala β	Bebauungsplanung	1:500
20 m	Kleinräumige Turbulenz, Bauwerkseffekte	Mikro-Skala γ		

den Stadt London. Hier widmete sich als einer der ersten John Evelyn (1620–1706) in Einzelstudien der 'Luftverpestung' in ihrer Abhängigkeit zu den vorherrschenden Windrichtungen, dem Problem der 'Stadttemperatur' und des 'City Fogs'. Im Jahre 1661 fasste dieser seine Ergebnisse in der weithin bekannt gewordenen Monographie 'Fumifugium' zusammen.

Auf ersten systematischen Messungen beruhende Untersuchungen der stadtklimatischen Verhältnisse von London gehen hingegen auf den englischen Chemiker und Apotheker Luke Howard (1772–1864) zurück, der für die damaligen Verhältnisse schon mit großer Genauigkeit die thermischen Unterschiede zwischen London und seiner Umgebung in ihrer zeitlichen und räumlichen Abhängigkeit untersuchte und deren Zustandekommen erklärte. Howard belegte anhand umfangreicher Messungen, dass das Londoner Stadtgebiet eine höhere Lufttemperatur aufwies als das unbebaute Umland. Danach belief sich die Überwärmung in den Wintermonaten auf (umgerechnet) 1 K, in den Sommermonaten auf 0,6 K. Er schloss daraus, dass diese Lufttemperaturunterschiede vornehmlich auf den intensiven Verbrauch des Brennstoffs Kohle für Heiz- und Kochzwecke zurückzuführen seien. Auch konnte Howard auf der Grundlage seiner Beobachtungen zum winterlichen Nebelproblem – der Begriff 'city-smog' wurde von ihm geprägt – die durch Smog (smoke + fog) stark verrauchte Londoner Innenstadt von dem häufiger nebelfreien Umland abgrenzen (Howard 1833). Aufbauend auf den von Howard durchgeführten Untersuchungen schlossen sich zahlreiche Arbeiten zur Erforschung des Stadtklimas – insbesondere auch in Deutschland – an. Das in der Folgezeit immer umfangreicher werdende Datenmaterial er-

laubte es schließlich dem Benediktinerpater Albert Kratzer im Jahre 1937, einen ersten und für die damalige Zeit äußerst umfassenden Überblick über den Wissensstand dieser noch relativ jungen Forschungsdisziplin zu geben. So konnte Kratzer in seiner Dissertation über 'Das Stadtklima' bereits auf 225 Publikationen zurückgreifen. Diese Monographie erlebte 1956 unter Verwendung von bereits 533 Literaturzitierten eine zweite, stark erweiterte Auflage und galt weltweit lange Zeit als wichtigstes Grundlagenwerk der Stadtklimatologie (Kratzer 1956). Es dauerte Jahrzehnte, bis 1981 erneut eine Monographie zur Stadtklimatologie mit dem Titel 'The Urban Climate' des Deutsch-Amerikaners Helmut Landsberg (1981) erschien, in der neben der urbanen Luftqualität auch erste Planungsprobleme aufgegriffen wurden. Eine vertiefende Behandlung dieser beiden vom Stadtklima nicht zu trennenden Aspekte erfolgte letztlich in dem anwendungsorientiert ausgerichteten Kompendium 'Stadtklima und Luftreinhaltung' (Helbig et al. 1999).

2 Stadtklimatische Eigenschaften, Nachweise und Methoden

2.1 Charakteristika des Stadtklimas

Das Erscheinungsbild des Stadtklimas setzt sich aus zahlreichen Komponenten zusammen, an denen alle Klimatelemente mehr oder weniger beteiligt sind. Bevor hierauf näher eingegangen wird (vgl. Teil 2), sollen die wichtigsten Unterschiede zwischen Stadt und Umland am Beispiel westeuropäischer Großstadtbedingungen im Überblick kurz referiert werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Charakteristika des Stadtklimas einer Großstadt in den mittleren Breiten (nach verschiedenen Autoren; hier in der Fassung nach Hupfer und Kuttler 1998; verändert)

Einflussgrößen	Veränderungen gegenüber dem nicht bebauten Umland	Einflussgrößen	Veränderungen gegenüber dem nicht bebauten Umland
Globalstrahlung (horizontale Fläche)	bis -10%	Wind – Geschwindigkeit – Richtungsböigkeit – Geschwindigkeitsböigkeit	bis -20% stark variierend erhöht
Albedo	±	Luftfeuchtigkeit	±
Gegenstrahlung	bis +10%		
UV-Strahlung im Sommer im Winter	bis -5% bis -30%	Nebel – Großstadt – Kleinstadt	weniger mehr
Sonnenscheindauer im Sommer im Winter	bis -8% bis -10%	Niederschlag – Regen – Schnee – Tauabsatz	mehr (leeseitig) weniger weniger
Sensibler Wärmestrom	bis +50%	Luftverunreinigungen – CO, NO _x , AVOC ¹⁾ , PAN ²⁾ – O ₃	mehr weniger (Spitzen höher)
Wärmespeicherung im Untergrund und Bauwerken	bis +40%	Bioklima Vegetationsperiode	bis zu zehn Tage länger
Lufttemperatur – Jahresmittel – Winterminima – in Einzelfällen	~ + 2 K bis + 10 K bis + 15 K	Dauer der Frostperiode	bis -30%

¹⁾ = anthropogene Kohlenwasserstoffe
²⁾ = Peroxiacetyl Nitrat

Nähert man sich einer Stadt, so kündigt meist schon von weitem eine gut sichtbare Dunstglocke die erhöhte Belastung mit anthropogenen atmosphärischen Spurenstoffen an. Hierdurch erfolgt eine Abschwächung der Globalstrahlung ($K\downarrow$). In den frühen Jahren der Industrialisierung war dieser Einfluss in den Ballungsräumen wesentlich stärker ausgeprägt als der in Tabelle 2 angegebene Wert. Die $K\downarrow$ -Werte variieren sowohl in Abhängigkeit von der an die Jahreszeiten gebundenen erhöhten Belastung mit anthropogenen atmosphärischen Spurenstoffen als auch der Sonnenstandshöhe (Deklination, Azimut). Grundsätzlich ist aufgrund der Streuprozesse in der Stadtatmosphäre davon auszugehen, dass der Anteil der diffusen Strahlung (D) höher ist als derjenige der direkten Strahlung (I). Der höhere Anteil an D kommt dabei zum Beispiel der Innenraumbeleuchtung von Gebäuden zugute. Da im Allgemeinen die Partikel in der Stadtluft größere Durchmesser aufweisen als die in sauberer Luft, erscheint der Himmel an Strahlungstagen aufgrund der unterschiedlich stark wellenlängenabhängigen Reflexion und Streuung über Städten weniger intensiv blau als über dem Umland.

Die kurzwellige Reflexion ($K\uparrow$) an den städtischen Oberflächen ist von deren Farbe, Struktur und Geometrie abhängig und erreicht – bei Abwesenheit von Schnee – vergleichbare Werte wie die des nicht bewaldeten Umlands. In mediterranen Städten können allerdings – wegen der dort meist weiß getünchten Häuser – die Oberflächenalbeden durchaus höher als die Umlandwerte sein, was sich in erheblichem Maße auf die Strahlungsbilanz ($Q\downarrow$) auswirkt. Aber auch hier hängt der Unterschied zwischen urbanen und ruralen Werten jeweils von der Farbe – und damit von der Flächennutzung – des Umlands ab. Im Gegensatz zu $K\downarrow$ sind die Werte der aus dem Halbraum über der Stadt zum Boden gerichteten langwelligen atmosphärischen Gegenstrahlung ($L\downarrow$) im Allgemeinen erhöht. Das ist nicht nur auf die stärkere Absorption und Reemission infrarotaktiver Gase und Partikel in der Stadtluft zurückzuführen, sondern auch darauf, dass die Stadtatmosphäre insbesondere bei schwachem übergeordnetem Gradientwind wärmer ist als die Umlandluft. Hierdurch wird eine stärkere langwellige Ausstrahlung auch in Richtung bebaute Fläche verursacht.

Die ultraviolette Strahlung (UV_{ges} ; $100\text{ nm} < \lambda < 400\text{ nm}$) führt zu günstigen (Initiierung der Vitamin D_3 -Synthese), in hohen Dosen aber auch zu gesundheitsschädigenden Wirkungen (Auslösung von Erythemen sowie Hautkrebs-erkrankungen). Sie wird in der verschmutzten Stadtatmosphäre bevorzugt ausgefiltert und weist insbesondere in den Wintermonaten deutlich niedrigere Werte zum Umland auf (Abnahmen um bis zu Faktor 10; Landsberg 1981).

Die Sonnenscheindauer ist in urbanen Straßenschluchten generell wegen der durch die Bebauung verursachten größeren Verschattung verkürzt, wobei Extremwerte durch ungünstige Ausrichtung, Höhe und Bestandsdichte der Gebäude erreicht werden.

Die turbulenten Ströme der fühlbaren Wärme (Q_H) und der latenten Wärme (Q_E) sind in Stadtgebieten deutlich modifiziert, und zwar wiederum in starker Abhängigkeit zur jeweiligen Flächennutzung, der vorherrschenden Witterung sowie von der Tages- und Jahreszeit. Durchschnittswerte,

die sich auf Stadtoberflächen beziehen, zeigen, dass das mittlere Bowen-Verhältnis ($Bo = Q_H/Q_E$) meist deutlich über 1 liegt, wodurch der überragende Einfluss von Q_H auf die Erwärmung der Stadtatmosphäre dokumentiert wird. Die tagsüber in den Baumaterialien von Gebäuden, Straßen und Plätzen gespeicherte Wärme (Q_B ; 'Tagspeicher') stellt aufgrund der überwiegend hohen Werte ein wichtiges Glied in der urbanen Energiebilanz dar (vgl. Teil 2, Abschnitt 1.3). Im Ergebnis sind die städtischen Lufttemperaturen vergleichsweise zum Umland im Jahresmittel um 1 bis 2 K erhöht. Jedoch bestimmen Stadtgröße und -struktur sowie Wetterlage und Jahreszeit erhebliche Abweichungen von diesen Werten, die im Einzelfall und über kurze Zeit nachts durchaus 10 K bis 15 K betragen können. Die Windgeschwindigkeit ist in den Städten gegenüber dem Umland im Durchschnitt geringer. Das liegt daran, dass die durch die Bebauung verursachte Erhöhung der Bodenrauigkeit die Strömung behindert. Dadurch nimmt der atmosphärische Austauschkoefizient A für Eigenschaftstransporte ($A = \rho_L K_{turb}$; mit K_{turb} = turbulenter Diffusionskoeffizient und ρ_L = Dichte der Luft) im Allgemeinen niedrige Werte an, wodurch sich z.B. die Luftqualität verschlechtern und die nächtliche Überwärmung in den Straßenschluchten kaum abgeführt werden kann. Allerdings ist die Geschwindigkeitsböigkeit an Gebäudekanten sowie in Nachlaufwirbeln hinter Gebäuden erhöht, während die Richtungsböigkeit stark variiert.

Die relative Luftfeuchtigkeit weist in Städten wegen der eingeschränkten Evapotranspiration (Evaporation + Transpiration) im Allgemeinen niedrigere Werte auf, was sich insbesondere tagsüber bemerkbar macht. Nachts jedoch können höhere städtische Oberflächentemperaturen Tauabsatz vergleichsweise zum kühleren Umland verzögern oder sogar gänzlich verhindern, wodurch sich gleich hohe oder höhere relative Luftfeuchtigkeitswerte in den urbanen Gebieten einstellen. Allerdings sind die Verhältnisse in starkem Maße von den jeweiligen mikroskaligen Standortbedingungen abhängig (vgl. Teil 2).

Nebel ist in Großstädten – zumindest in den vergangenen Jahren – seltener anzutreffen als im Umland, was auf die inzwischen geringere Kondensationskerndichte, die höheren Lufttemperaturen und die geringere Luftfeuchtigkeit zurückzuführen sein dürfte. Niederschläge hingegen sind insbesondere in Lee urbaner Siedlungsräume erhöht.

Die Zusammensetzung der urbanen Luft hat sich durch die Dominanz von Kfz-Emissionen im Vergleich zu früheren Jahren, die hauptsächlich durch Industrie- und Hausbrandemissionen (Staub und SO_2) geprägt waren, stark verändert. Heute spielen in der urbanen Belastung mit anthropogenen atmosphärischen Spurenstoffen – trotz Einführung des Katalysators – NO , NO_2 , O_3 und anthropogene Kohlenwasserstoffe (AVOC) sowie insbesondere Feinstäube und Ruß ($PM_{2,5}$; PM_{10}) eine herausragende Rolle.

Abschließend bleibt im Rahmen dieses Überblicks festzustellen, dass die genannten Klima- und Lufthygienekomponenten in vielfältiger Weise positiv, aber auch negativ auf die in Städten lebenden Bewohner sowie Pflanzen und Tiere einwirken. Während unter human-biometeorologischen Gesichtspunkten im Bereich des thermischen und lufthygieni-

schen Sektors eher Nachteile für die Stadtbewohner zu erwarten sind (vgl. Teil 2, Abschnitt 2), führen z.B. bei Pflanzen die höheren Stadttemperaturen zu einer Veränderung der Aspektwechsel durch vorgezogene Blüh- und Reifephasen sowie zu einer deutlichen Verlängerung der Vegetationsperioden im Vergleich zum Umland. Wie das für die Stadt Wien in **Abb. 1** dargestellte Beispiel zeigt, öffnen sich aufgrund der städtischen Überwärmung und der Straßenbeleuchtung die ersten Blüten im Stadtzentrum etwa 25 Tage eher als im Umland. Damit können Pflanzen als Standortklimaanzeiger neben physikalisch-chemischen Messungen auch für stadtklimatische Untersuchungen genutzt werden.

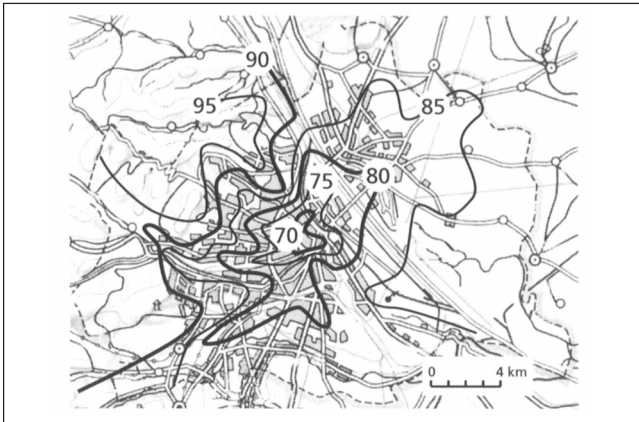


Abb. 1: Stadtphänologie einer Großstadt (Wien): Isophanen des Blühbeginns von *Forsythia suspensa* als temperaturabhängigem Standortklimaanzeiger. Die Datumslinie 70 entspricht dem Kalenderdatum 11. März 1988, die Datumslinie 95 dem 5. April 1988. Nach Bernhofer (1991, zit. in Larcher 2001). Wegen der urbanen Überwärmung und der Straßenbeleuchtung öffnen sie sich früher als im Umland. Der Vegetationszeitraum mit Tagesmitteln über 5 °C dauert in der Innenstadt durchschnittlich 265 Tage, an der Stadtgrenze (*gestrichelte Linie*) hingegen im Mittel nicht mehr als 245 Tage (hier nach Larcher 2001)

2.2 Nachweis von Stadtklimaeffekten

Der qualitative und quantitative Nachweis des in Städten auftretenden 'Sonderklimas' leidet grundsätzlich darunter, das bestehende urbane Klima ausschließlich auf stadtbedingte Ursachen zurückführen zu können. Es muss berücksichtigt werden, dass es sich bei den Messwerten an einem urbanen Standort um einen zusammengesetzten Wert (W) handelt, der aus wenigstens drei Einzelkomponenten besteht, die in unterschiedlichem Maße an seinem Zustandekommen beteiligt sind (Lowry 1977). Es sind dies

- eine globalklimatische, durch die geografische Lage großräumig vorgegebene Wirkgröße ('Hintergrundwert' H),
- eine durch die Topografie bestimmte regionale Beeinflussung ('Topografiewert' T) sowie
- einen auf die Verstädterung zurückzuführenden Einfluss ('Verstädterungswert' V).

In Gl. 1 ist dieser Sachverhalt dargestellt, wobei ergänzend der Witterungstyp (i), der Messzeitpunkt (t) sowie die genaue räumliche Zuordnung des Messstandortes im Stadtgebiet (x) bekannt sein müssen.

$$W_{itx} = H_{itx} + T_{itx} + V_{itx} \quad (1)$$

Um den klimatischen Einfluss zu ermitteln, der ausschließlich auf die Verstädterung zurückzuführen ist, wäre es notwendig, den zum aktuellen Zeitpunkt während einer bestimmten Wetterlage an einem festgelegten Standort gemessenen Wert $W_{it(akt)x}$ ('Aktualwert') von demjenigen Messwert abzuziehen, der bei gleicher Wetter- und Standortlage sowie in der Zwischenzeit nicht verändertem Globalklima vor Errichtung der Stadt, das heißt in der präurbanen Phase ('Präurbanwert'), gemessen wurde ($W_{it(präurb)x}$). Stünden zwischen diesen Anfangs- und Endwerten in zeitlich hoher Auflösung Einzeldaten für den gleichen Standort zur Verfügung, ließe sich eine Zeitreihe der klimatischen Entwicklung des Standortes ermitteln. Eine derartige Vorgehensweise zur Bestimmung des verstädterungsbedingten Klimaeffektes ist meistens nicht möglich, da die entsprechenden Daten fehlen. Einzige Ausnahme dürfte in diesem Zusammenhang die Stadt Columbia, Maryland, sein, deren Entwicklung von 200 Einwohnern (1968) auf 20 000 Einwohner (1975) mit ununterbrochen gemessenen Klimadaten an gleichen Standorten belegt werden konnte (Landsberg 1979). In allen anderen Fällen, für die präurbane Werte nicht zur Verfügung stehen, muss entweder auf

- die Analyse von Vergleichsmessungen (präurban/urban) im Windkanal bzw. durch numerische Simulation,
- Regressionsanalysen einzelner Klimaparameter in Abhängigkeit von der Zeit oder
- aktuelle Geländemessungen an mindestens zwei Stationen, die die urbane und rurale Situation repräsentieren bzw. auf mobile Messungen mit einem Fahrzeug auf Routen innerhalb und außerhalb eines Stadtgebietes

zurückgegriffen werden. Üblicherweise wird dem letztgenannten Punkt der Vorzug bei Stadtklimaanalysen gegeben, wobei jedoch darauf zu achten ist, dass der rurale Stationsstandort weder durch den Stadteffekt (zum Beispiel durch die städtische Abluftfahne) noch durch unterschiedliche Höhen- oder Tallage, See- oder Waldnähe beeinflusst wird. Zeitreihen, die mindestens ein Jahr umfassen, erlauben darüber hinaus eine wetterlagen- und jahreszeitenabhängige Auswertung.

2.3 Stadtklimatische Erfassungsmethoden

Zur Erfassung der klimatischen und lufthygienischen Parameter wird in der Regel auf ein differenziertes, die jeweilige Fragestellung berücksichtigendes Methodenspektrum zurückgegriffen. Grundsätzlich gibt es keine spezielle, auf die Lösung stadtklimatischer Probleme bezogene Untersuchungsmethodik. Vielmehr wird sich im Bedarfsfall derjenigen Analysetechniken bedient, die bei umweltmeteorologischen Untersuchungen im Mikro-/Mesobereich Anwendung finden. Die in **Abb. 2** zusammengestellte Übersicht setzt sich aus insgesamt vier Untersuchungsschritten zusammen, die letztlich das methodische Vorgehen bestimmen sollten. Hierbei handelt es sich um

- die fachwissenschaftliche Auswertung vorhandenen Datenmaterials,
- Datenerhebungen im Gelände durch In Situ-Messungen und Beobachtung bzw. Einsatz von Fernerkundungsverfahren sowie pflanzenphänologische Untersuchungen und Bioindikation,
- die Anwendung physikalischer beziehungsweise numerischer Modellsimulationen zur Diagnose und Prognose sowie
- die Bewertung der Ergebnisse mit Hilfe von Qualitätsstandards.

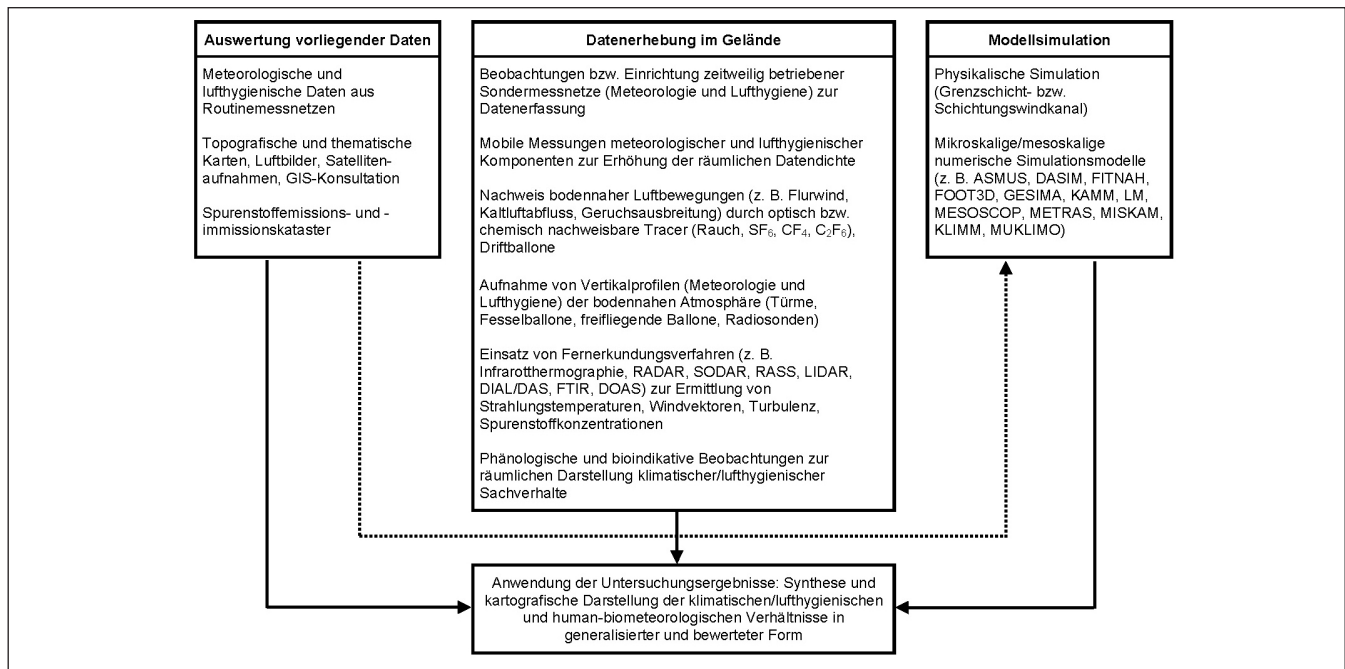


Abb. 2: Klimatische und lufthygienische Untersuchungsmethoden in der Umweltmeteorologie (VDI 3787, Bl. 9, 2002)

In einem ersten Schritt einer Stadtklimauntersuchung sollte geprüft werden, ob bereits vorhandenes Datenmaterial (topografische und thematische Karten, Pläne, Tabellen etc.) über das Untersuchungsgebiet vorliegt, auf das zurückgegriffen werden kann.

Aufbauend auf der Analyse vorhandener Daten ist dann zu entscheiden, ob es für die Problemlösung notwendig ist, Messungen im Gelände vorzunehmen oder auf Simulationen zurückzugreifen, die auf physikalischen (im Windkanal durchzuführende) bzw. mathematischen Modellen beruhen (Manier 1998).

Grundsätzlich ist bei der Durchführung von Geländemessungen auf die Wahl repräsentativer Messstandorte für die zu erfassenden meteorologischen und lufthygienischen Größen zu achten. Das kann wegen der Heterogenität städtischer Flächennutzungen und der meist nur in begrenztem Umfang zur Verfügung stehenden Temporärstationen nur über eine sinnvolle Generalisierung und Aufteilung des Stadtkörpers in Gebiete gleichartigen klimatischen beziehungsweise lufthygienischen Verhaltens erreicht werden. Derartig generierte räumliche Einheiten nennt man 'Klimatope' beziehungsweise 'Aerotope' (Scherer et al. 1999), wofür im anglo-amerikanischen Sprachgebrauch der Begriff Urban Terrain Zone verwendet wird (Ellefsen 1990/91).

In-Situ Messungen an Temporärstationen besitzen den Vorteil, dass ortsbezogene Daten mit hoher zeitlicher Auflösung erhoben werden können. Bei Vorhandensein eines aus mehreren Stationen bestehenden Messnetzes sind über die singulären Standortwerte auch raum-zeitliche Daten zu gewinnen. Diese können jedoch dreidimensional kaum aufgelöst werden, wenn nicht durch Vertikalsondierungen innerhalb der bodennahen Atmosphäre zusätzliche Informationen zur Verfügung stehen. Die über derartige Messnetze ermittelten

Daten lassen sich in erster Linie zur Lösung diagnostischer Probleme heranziehen; eine Prognosefähigkeit besitzen sie allerdings kaum.

Geländemessungen können sowohl durch standortbezogene Vor-Ort-Messungen erfolgen (zum Beispiel an dafür eingerichteten Messstationen) als auch mit Hilfe von Fernerkundungsverfahren (siehe unten) durchgeführt werden. Ergänzt werden beide Verfahren gegebenenfalls durch die Anwendung indirekter Verfahren, wie die Pflanzen-Phänologie sowie aktive und passive Bioindikation.

Ferner ist festzulegen, welche Messgrößen an welchen Standorten, über welcher Oberfläche, in welcher Höhe über Grund, mit welchen Instrumenten und in welcher zeitlichen Auflösung über welchen Zeitraum erfasst werden sollen (Reuter und Hoffmann 1998). Häufig muss dabei von den jeweiligen Standardmesshöhen abgewichen werden.

Ist die Luftqualität an Einzelstandorten zu erfassen, können aktive oder passive Probenahmeverfahren eingesetzt werden (Moriske 2000). Aktive Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass Luft mittels einer Pumpe durch ein Messgerät geleitet wird. Unterschieden werden dabei kontinuierliche Messungen, die aus einer selbstständig erfolgenden Probennahme, analytischen Bestimmung sowie anschließenden Messwert-erzeugung vor Ort bestehen, von diskontinuierlichen Verfahren, bei denen die Probennahme von der Analyse getrennt ist. Mit Hilfe von Passivverfahren werden 'Immissionsraten' bestimmt. Da sich die Messdauer bei den letztgenannten Verfahren im Allgemeinen über mehrere Tage erstreckt, ist eine Verknüpfung der lufthygienischen mit meteorologischen Daten kaum möglich. Über die Vor- und Nachteile von aktiven und passiven Probenahmeverfahren informiert **Tabelle 3**. Kontinuierliche Immissionsmessungen erfordern in der Regel einen hohen apparativen, logistischen und damit kos-

Tabelle 3: Vor- und Nachteile aktiver und passiver Probennahmeverfahren im Vergleich (Moriske 2000)

	Aktive Verfahren	Passive Verfahren
Prinzip	– Aktive Ansaugung der Luft mittel Pumpen	– Passive Erfassung durch Diffusion
Vorteile:	<ul style="list-style-type: none"> – Hohe zeitliche Auflösung – Erfassung von Kurzzeitspitzenwerten – Kontinuierliches Messen – (In der Regel) hohe Genauigkeit und Präzision – Geringe Nachweisgrenzen 	<ul style="list-style-type: none"> – Flexible und mobile Probennahmetechnik – Hohe räumliche Auflösung (preiswerte Methode) – Keine Geräuschentwicklung – Unabhängigkeit vom Stromnetz
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> – Hoher Kostenaufwand – Regelmäßige Wartung und Kontrolle – Geräuschentwicklung – Elektrischer Anschluss – (In der Regel) nur stationärer Betrieb 	<ul style="list-style-type: none"> – Geringe zeitliche Auflösung – Genauigkeit und Präzision hängen von Umgebungseinflüssen und der Geräte- bzw. Aufhängekonstruktion ab – Direkter Vergleich mit Grenzwerten nur bedingt möglich

tenintensiven Aufwand. Sie werden deshalb seltener eingesetzt als diskontinuierliche Verfahren, die zwar wesentlich kostengünstiger, aus den oben genannten Gründen jedoch auch ungenauer sind (Möller 2003).

Ein grundsätzliches Problem der an Temporärstationen gewonnenen meteorologischen und lufthygienischen Daten stellt deren geringe räumliche Repräsentanz dar. Um flächenhafte Aussagen treffen zu können, sind deshalb weitere Methoden – zum Beispiel mobile Messwerterfassungen oder Modellsimulationen – anzuwenden.

Mobile Messwerterfassungen, insbesondere zum Nachweis meteorologischer Parameter (vor allem Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit) sind schon seit langer Zeit Bestandteil der Stadtklimaforschung (Überblick in Persson 1997). Hingegen werden lufthygienische Messungen mit diesen Verfahren erst seit einigen Jahren erfolgreich durchgeführt (Mayer und Hausteil 1994, Kuttler und Wacker 2001). Mobile Messungen erfolgen meist mit Hilfe geeigneter Fahrzeuge, die mit geringer Geschwindigkeit und entsprechender Messausrüstung festgelegte Routen durch repräsentative Flächennutzungen in der Regel während schwachwindiger Strahlungswetterlagen befahren. Erfolge derartige Messfahrten über mehrere Stunden, müssen vom Tagesgang abhängige Einflüsse durch geeignete Korrekturverfahren kompensiert werden. Die geringe zeitliche Repräsentativität mobiler Messungen kann durch Wiederholungsfahrten erhöht werden (Kuttler et al. 1996).

Im Rahmen stadtklimatologischer Untersuchungen kann der Nachweis der rural-urbanen Belüftung einen besonderen Stellenwert einnehmen. Um zum Beispiel festzustellen, ob Kaltluft- oder sogar Frischlufttransporte zwischen Umland und Stadt über Luftleitbahnen während schwachgradientiger Wetterlagen erfolgen (Matzarakis und Mayer 1992), werden dazu optische Tracer (Raucherzeuger) oder chemische Tracer (z.B. SF₆, CF₄, C₂F₆; Eggert 1999, Weber und Kuttler 2003) in die bodennahe Atmosphäre des Kaltluftentstehungsgebietes emittiert und im städtischen Bereich (Zielgebiet) detektiert. Soll auch die Qualität der transportierten Luft ermittelt werden, ist es notwendig, lufthygienische Messungen mit einem mobilen Messlabor innerhalb der Luftleitbahnen vorzunehmen.

Mit Hilfe von Fernerkundungsverfahren, die boden- oder luftgestützt arbeiten, lassen sich sowohl meteorologische als auch lufthygienische Größen nachweisen. Methodisch nutzt

man dabei entweder die Wechselwirkung von Schallwellen (beispielsweise SODAR, RASS) oder elektromagnetische Strahlung verschiedener Wellenlängen (RADAR; UV-, VIS- oder IR-Bereich) mit festen, flüssigen beziehungsweise gasförmigen Bestandteilen der Atmosphäre oder aber dem Erdboden (Emeis 2000, Foken 2003). Der Einsatz akustisch arbeitender Geräte kann wegen der häufig nicht unerheblichen Geräuschemissionen zu Konflikten – insbesondere bei Nachtmessungen – mit der Bevölkerung führen. Verfahrensbedingt beziehen sich die Ergebnisse der Fernerkundungsmethodik nicht auf Einzelpunkte, sondern auf Messstrecken, Volumina oder Flächen.

In der Stadtklimaforschung ist die Verwendung von Infrarothermalaufnahmen zum Nachweis von Oberflächenstrahlungstemperaturen und daraus abgeleiteter Größen seit langer Zeit Tradition (Parlow 2003). Die meist unter Einsatz der Falschfarbenfotografie hergestellten Karten erlauben – je nach Pixelgröße – hoch aufgelöste flächendeckende Darstellungen der Temperaturverhältnisse für die Aufnahmezeitpunkte. Hierbei – wie auch bei anderen flächendeckend arbeitenden Verfahren – muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich um die zweidimensionale Projektion eines dreidimensionalen, gerade in Stadtgebieten äußerst heterogen genutzten Raumes handelt. Ferner muss bedacht werden, dass die durch ein Thermalbild repräsentierten Oberflächentemperaturen in Bezug auf den langwelligen Emissionsgrad (ϵ) nicht automatisch differenziert werden und somit den auf dem materialspezifischen ϵ -Wert beruhenden Unterschied zwischen Ausstrahlungs- und Oberflächentemperatur entstehen lassen. Diese Differenz kann sich im Einzelfall durchaus auf einige Kelvin belaufen und damit bei der Auswertung Interpretationsprobleme verursachen. Auch ist es kaum möglich, aus Thermalbildaufnahmen flächenbezogene Lufttemperaturen für die bodennahe Atmosphäre abzuleiten. Dennoch können Thermalbildkarten im Rahmen einer Stadtklimauntersuchung als zusätzlich angewandte Hilfsmittel wertvolle Dienste leisten, da eine Generalisierung und eine eventuelle Zusammenfassung thermisch ähnlich reagierender Flächen leichter möglich ist und diese somit für die eventuelle Planung eines Messnetzes herangezogen werden kann.

Die unbestreitbaren Vorteile der Anwendung physikalischer oder numerischer Modellsimulationen sind in der Erzeugung meist hoch aufgelöster dreidimensionaler Datenfelder zu sehen, woraus Raumausagen abgeleitet und bei Bedarf auch

verschiedene Planungsszenarien dargestellt werden können. Der Nachteil des Einsatzes von Modellsimulationen ist allerdings, dass viele der verwendeten Größen parametrisiert werden müssen und deshalb nur ein unvollkommenes Bild der Realität widerspiegeln (Groß und Etling 2003).

Insbesondere in der praxisorientierten Stadtklimatologie spielt die möglichst objektive Bewertung der Mess-, Berechnungs- oder Beobachtungsergebnisse gerade im Rahmen human-biometeorologischer Aspekte eine wichtige Rolle (siehe Teil 2, Abschnitt 2). Die Ziele einer derartigen Evaluation liegen vor allem in der begründeten Ausweisung klimatischer und/oder lufthygienischer Belastungs- beziehungsweise Ausgleichsräume, in der Klassifizierung der Empfindlichkeit einer Fläche gegenüber bestimmten Nutzungen oder der Inwertsetzung eines klimatisch-lufthygienischen Phänomens in Hinblick auf die vorausschauende Optimierung von Flächennutzungen (Matzarakis 2001, Mayer und Matzarakis 2003). Hinsichtlich der Bewertungsverfahren unterscheidet man relative von absoluten Bewertungen. Bei der relativen Evaluation werden räumliche beziehungsweise zeitliche Unterschiede von gemessenen Größen festgestellt, ohne dass diese auf Standards bezogen werden. Eine absolute Bewertung orientiert sich hingegen an entsprechenden Prüfgrößen, die rechtsverbindlichen Charakter tragen können.

3 Ursachen des Stadtklimas

Die Ursachen des urbanen Klimas sind sowohl auf makroskalige als auch auf mikro- und mesoskalige Einflussgrößen zurückzuführen. Zur Gruppe der makroskalig wirksam werdenden Faktoren zählen

- die Breitenlage bzw. Klimazone,
- die Oberflächenformen und deren Beschaffenheit (Relief- und Topografieverhältnisse) sowie
- die Entfernung zu großen Wasserkörpern.

Die Gruppe der mikro- bis mesoskalig wirksamen Einflussgrößen besteht in erster Linie aus

- der Stadtgröße,
- der Einwohnerzahl,
- der Art der urbanen und ruralen Flächennutzungen,
- die kleinräumigen topografischen urbanen und ruralen Verhältnisse,
- der Höhe des Versiegelungsgrads des Bodens,
- der Intensität der dreidimensionalen Strukturierung eines Stadtkörpers sowie
- der Emissionsstärke gasförmiger, fester und flüssiger Luftbeimengungen sowie fühlbarer und latenter Abwärme aus technischen Prozessen (Q_{anth}).

Die Einflüsse der eher großräumig wirkenden Faktoren treten im Allgemeinen hinter diejenigen der Meso- und Mikroskala zurück, wie Wienert (2002) anhand der Auswertung umfangreichen statistischen Materials belegen konnte.

Wichtige stadtklimatische Steuerungsgrößen stellen neben der Größe und Struktur von Städten somit in erster Linie die auf dem thermischen und hydrologischen Verhalten der städtischen Baukörper beruhenden Oberflächenenergiebilanzen, die Zuordnung und Mischung von bebauten und nicht bebauten Flächen, die Abwärme- und Wasseremissionen sowie die Freisetzungstärke von Luftverunreinigungen dar. Hierauf soll nachfolgend eingegangen werden.

3.1 Quantifizierung der stadtklimatischen Wirkungsfaktoren

3.1.1 Thermische und hydrologische Eigenschaften städtischer Oberflächen

Ein Charakteristikum urbaner Oberflächen ist deren Versiegelung. Hierunter versteht man eine mehr oder weniger vollständige Abdichtung der Oberflächen durch undurchlässige Stoffe, so dass Flüssigkeiten, insbesondere Wasser, aber auch Gase nicht mehr zwischen Boden und Atmosphäre ausgetauscht werden können. Unterschieden wird eine Überflur- von einer Unterflurversiegelung. Bei letzterer handelt es sich um die Einschränkung von Energie- und Stofftransporten innerhalb des Untergrundes. Tunnel für Untergrundbahnen, Kanal- und Leitungssysteme, Tiefgaragen aber auch Untergrundpassagen und -geschäftstraßen sind Beispiele dafür. Der Begriff Versiegelung ist nicht eindeutig definiert. Allgemein fasst man hierunter Siedlungsflächen zusammen, d.h. Gebäude- und Verkehrswegeflächen sowie Plätze, ohne dass eine weitere Differenzierung durch die Angabe von Porositäts- bzw. Wasserdurchlässigkeitswerten erfolgt. Einzelne Versiegelungsstufen sind mit entsprechenden Beispielwerten in **Tabelle 4** enthalten. Als Versiegelungsgrad wird das Verhältnis von versiegelter Fläche zur entsprechenden Gesamtstadtfläche bezeichnet. Der durchschnittliche Anteil der versiegelten Flächen in Deutschland stieg von 7,7% (1950/51) auf 12,2% (1997) der Staatsfläche an. Mittelwerte des Versiegelungsgrades deutscher Großstädte (z.B. Essen) erreichen Werte von bis zu 0,6, während in Innenstädten und reinen Industriegebieten solche von bis zu 1 auftreten. Entsiegelungsmaßnahmen während der vergangenen Jahre haben allerdings in einigen Städten wieder zu einem größeren Freiflächenanteil geführt.

Versiegelte und nicht versiegelte Flächen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer thermischen und hydrologischen Reaktionen in starkem Maße voneinander und beeinflussen deshalb in besonderer Weise die klimatischen Verhältnisse von Siedlungsgebieten.

Tabelle 4: Beschreibung der Versiegelungsstufen (nach Wessolek und Renger 1998)

Versiegelungsstufe %	Flächencharakteristik
I 10 – 50	Mäßige Versiegelung, Einfamilienhaussiedlungen, Kleingartengebiete, Zeilenhaussiedlungen Mittelwert 30 % = Stufe I
II 45 – 75	Mittlere Versiegelung, Blockrandbebauung, Nachkriegsbaugebiete Mittelwert 60 % = Stufe II
III 70 – 90	Starke Versiegelung, städtische Baugebiete mit Blockbebauung, ältere Industrieanlagen Mittelwert 80 % = Stufe III
IV 85 – 100	Sehr starke Versiegelung, unzerstörte Blockbaugebiete der Innenstadtbezirke und Industrie- flächen, die in jüngerer Zeit entstanden oder verändert worden sind Mittelwert 90 % = Stufe IV

3.1.1.1 Thermische Eigenschaften städtischer Oberflächen

Farbe, Zusammensetzung, Bedeckung, Versiegelungsgrad, Oberflächenrauigkeit, Wasserversorgung sowie Ausrichtung zum solaren Strahlungseinfall entscheiden darüber, wie viel Energie über die urbanen Oberflächen aufgenommen, in der Bausubstanz 'gespeichert' bzw. von dieser an die Atmosphäre abgegeben wird. Damit bestimmt die Strahlungsbilanz (Q^*) der Oberflächen das jeweilige thermische Mikroklima. (Tabelle 5).

So werden beispielsweise extreme Werte für Stahl erreicht, der in Verbindung mit Beton vielfach verwendeter Baustoff in Städten ist. Stahlbetonbauten erreichen die höchsten Wärmespeicherfähigkeiten künstlicher Materialien. Die Bodenfeuchte spielt für den Wärmehaushalt ebenfalls eine wichtige Rolle, wie der Vergleich eines trockenen mit einem wassergesättigten (Lehm-)Boden zeigt. Die thermischen Eigenschaften erhöhen sich in feuchtem Boden zum Teil erheblich. Für das thermische Bodenklima resultiert daraus, dass Temperaturänderungen zwar schneller und in größere Tiefen vordringen als in trockenen Substraten, an der Oberfläche sich jedoch – bedingt durch den Energieaufwand für die Evaporation – niedrigere Temperaturen einstellen. Dadurch wird letztendlich jedoch weniger Energie über $L\uparrow$ und Q_H an die Atmosphäre abgegeben und in den Boden transportiert.

Asphaltflächen stellen in Städten typische Flächenversiegelungsmaterialien dar und zeichnen sich im Vergleich zu natürlichem Boden (trockener Lehm Boden) über eine dreimal so hohe Wärmeleitfähigkeit, doppelt so hohe Temperaturleitfähigkeit und einen über dreimal so hohen Wärmeeindringkoeffizienten aus. Sie absorbieren aufgrund ihrer überwiegend dunklen Farbe viel Strahlungsenergie, die sowohl über die langwellige Ausstrahlung ($L\uparrow$) und den turbulenten sensiblen Wärmestrom (Q_H) in die Luft gelangt als auch über

die Wärmeleitung in die Tiefe (Q_B) transportiert wird und dort solange verbleibt (Wärmereservoir), bis der Temperaturgradient sein Vorzeichen ändert. Asphaltflächen heizen sich im Vergleich zu natürlichen Materialien bei starker sommerlicher Einstrahlung dann am stärksten auf, wenn sie trocken sind, da kein Energietransport über die Verdunstung (Q_E) stattfindet. Dadurch steht der Betrag der Strahlungsbilanz ausschließlich für die turbulente Lufterwärmung und die Bodenerwärmung zur Verfügung. Das unterscheidet eine derartige Oberfläche von natürlichem Boden, der meistens Feuchtigkeit enthält und diese unter Aufwand von Energie in die Atmosphäre transportiert. Dieser Anteil steht dann der Luft- und Bodenerwärmung nicht zur Verfügung, so dass natürliche Bodenoberflächen in der Regel kühler sind.

Das Temperaturverhalten einer trockenen sommerwarmen Asphaltfläche wird exemplarisch in Abb. 3 dargestellt. In Bezug auf die Lufttemperatur ist festzustellen, dass diese den ganzen Tag über – insbesondere zur Mittagszeit – deutlich niedriger ist als die Oberflächentemperatur. Daraus re-

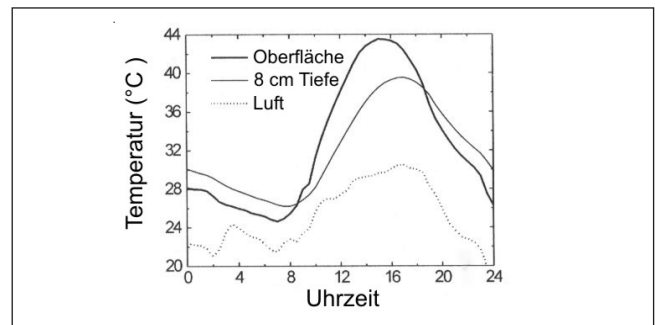


Abb. 3: Tagesgang der Luft-, Asphaltflächen- und Bodentemperaturen am 11.08.94 in Wien (Anandakumar 1999)

Tabelle 5: Thermische Eigenschaften künstlicher und natürlicher Materialien (nach Zusammenstellungen aus Oke 1990, Hupfer und Kuttler 1998, Zmarsly et al. 2002)

Material ^{a)}	Anmerkungen	Dichte ($\text{kg m}^{-3} \cdot 10^3$)	Spezifische Wärmekapazität ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1} \cdot 10^3$)	Wärmekapazi- tätsdichte ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1} \cdot 10^6$)	Wärmeleitfähig- keitskoeffizient ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Temperaturleit- fähigkeits- koeffizient ($\text{m}^2 \text{s}^{-1} \cdot 10^{-6}$)	Wärmeeindring- koeffizient ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-0,5} \text{K}^{-1}$)
Asphalt		2,11	0,92	1,94	0,75	0,38	1 205
Beton	Gasbeton	0,32	0,88	0,28	0,08	0,29	150
	Schwerbeton	2,40	0,88	2,11	1,51	0,72	1 785
Naturstein		2,68	0,84	2,25	2,19	4,93	2 220
Backstein	durchschnittl.	1,83	0,75	1,37	0,83	0,61	1 065
Lehmziegel	durchschnittl.	1,92	0,92	1,77	0,84	0,47	1 220
Holz	weich	0,32	1,42	0,45	0,09	0,20	200
	hart	0,81	1,88	1,52	0,19	0,13	535
Stahl		7,85	0,50	3,93	53,30	13,60	14 475
Glas		2,48	0,67	1,66	0,74	0,44	1 110
Gipsplatte	durchschnittl.	1,42	1,05	1,49	0,27	0,18	635
Dämmmaterial	Polystyrol	0,02	0,88	0,02	0,03	1,50	25
	Kork	0,16	1,80	0,29	0,05	0,17	120
Lehmboden (40% Poren- volumen)	trocken	1,60	0,89	1,42	0,25	0,18	600
	gesättigt	2,00	1,55	3,10	1,58	0,51	2 210
Wasser	4°C unbewegt	1,00	4,18	4,18	0,57	0,14	1 545
Luft	10°C unbewegt	0,0012	1,01	0,0012	0,025	20,50	5
	Turbulent unbewegt	0,0012	1,01	0,0012	≈ 125	$10 \cdot 10^6$	390

^{a)} Die Eigenschaften aller aufgeführten Größen sind temperaturabhängig

Tabelle 6: Oberflächenstrahlungstemperaturen verschiedener Flächennutzungen in Köln um 20 Uhr und um 3 Uhr während der Strahlungsnacht vom 30.06./01.07.1993 (Grundlage: IR-Thermalbefliegung, $\epsilon = 1,0$)

Oberfläche	T _O (20 MEZ) /K	T _O (3 MEZ) /K	$\Delta T_{O(20-3)}$ /K
Hauptstraße, Innenstadt	22	17	5
Hauptstraße, Umland	20	13	7
Gebäude, Innenstadt	21	17	4
Gebäude, Umland	21	13	8
Gleisanlage	21	12	9
Friedhof	19	12	7
Rhein	18	18	0
Wald	17	11	6
Acker	14	9	5

sultiert ein von der Oberfläche in die Atmosphäre gerichteter Energietransport, der tagsüber und nachts die Luft mit Wärme versorgt, und zwar sowohl über die langwellige Ausstrahlung als auch über den turbulenten sensiblen Wärmestrom. Es stellt sich aber auch zwischen Oberfläche und Boden (-8 cm) ein Temperaturgradient ein, der allerdings im Tagesgang das Vorzeichen und damit die Richtung ändert. Zwischen 10 Uhr und 18 Uhr ist dieser Gradient von der Oberfläche in den Boden gerichtet, wodurch ein Wärmetransport in die Tiefe erfolgt. In den Abend-, Nacht- und Morgenstunden (zwischen 18 Uhr und 10 Uhr) hingegen sind die Untergrundtemperaturen höher als die der Oberfläche, so dass die Richtung des Temperaturgradienten wechselt, wodurch Wärme nach oben geleitet wird. Dieser Wärmetransport sorgt dafür, dass auch nachts relativ hohe Oberflächentemperaturen – in diesem Fall zwischen 24°C und 26°C – erhalten bleiben. Die nächtliche Abkühlung über asphaltierten Flächen ist somit stark eingeschränkt. Das kann gerade in dicht bebauten und damit schlecht durchlüfteten Gebieten zu hohen nächtlichen Temperaturen führen.

Mit Hilfe von Infrarot-Thermalbildern lässt sich dieser Abkühlungsprozess für verschiedene Nutzungen flächenhaft darstellen, wenn Aufnahmen zu verschiedenen Zeiten durchgeführt wurden und diese miteinander verglichen werden. Beispiele hierfür sind **Tabelle 6** zu entnehmen. Hiernach ergeben sich für den Abendtermin (20 Uhr, MEZ) die höchsten Werte für die Nutzungstypen Hauptstraßen und Häuser in der Innenstadt sowie für Gleisanlagen. Am stärksten kühlen sich bis zum Vergleichstermin (3 Uhr, MEZ) Gleisanlagen ab (9 K) sowie Straßen und Gebäude im Umland (7 K resp. 8 K). Im Vergleich dieser Nutzungen zum 20 Uhr Ter-

min zeigt sich jedoch, dass die in der Innenstadt verlaufenden Straßen und gelegenen Gebäude eine wesentlich höhere Temperaturhaltefähigkeit besitzen. Die Innenstadtgebäude kühlen sich vergleichsweise nur halb so stark ab, wie die im Umland befindlichen. Die kältesten Flächen zum 3 Uhr Termin sind Äcker und Wälder, wo Kaltluft gebildet werden kann. Größere Wasserkörper (Rheinwasser) weisen hingegen meist keine Temperaturänderungen zwischen den beiden Terminen auf und bleiben nachts von den hier dargestellten Oberflächen am wärmsten.

3.1.1.2 Hydrologische Eigenschaften städtischer Oberflächen

Unter hydrologischen Eigenschaften urbaner Oberflächen sollen Abfluss, Infiltration (Eindringen von Wasser in den Untergrund), kapillarer Aufstieg von Wasser, Verdunstung sowie Versickerung (Durchgang von Sickerwasser durch ungesättigte Bodenhorizonte) von Niederschlagswasser verstanden werden. Diese Eigenschaften werden u.a. von der Versiegelung, dem Porenvolumen (Hohlraumanteil am Bodenvolumen) sowie der Porosität (Bruchteil des Porenvolumens am Boden) bestimmt. Der Oberflächenabfluss hängt außer vom Gefälle und Versiegelungsgrad auch von der material-spezifischen Benetzungskapazität ab. Eine starke Benetzung der Oberfläche führt zu einem verzögerten Abflussbeginn insbesondere dann, wenn nach starker Einstrahlung und Erwärmung der Versiegelungsmaterialien anschließend fallende Niederschläge z. T. sofort verdunsten. Hierbei können Werte von bis zu 0,6 mm – im Vergleich zu kühlerer Witterung – erreicht werden (Wessolek und Facklam 1997).

Für die Infiltration von Wasser in den versiegelten Untergrund sind Anzahl und Durchlässigkeit von Fugen und Rissen des abdichtenden Materials maßgeblich. Sind diese z.B. durch tonreichen Straßenstaub an der Oberfläche verstopft, so muss von geringeren Infiltrationsraten ausgegangen werden als bei durchlässigen, mit Sand gefüllten Öffnungen.

Für vier verschiedene typisch urbane Oberflächen enthält **Tabelle 7** die sich über ein Jahr ergebenden Wasserhaushaltskomponenten. Hieran zeigt sich auch die außerordentlich große Variabilität auf kleinem Raum. In Bezug auf den Abfluss weisen Asphaltflächen mit 72% des Niederschlags den größten Wert auf, während über Rasengittersteinflächen (typisch für befestigte Stellplätze) nur 5% abfließen. Bei der Versickerung kehren sich die Verhältnisse jedoch um: Während in den Asphalt nur 8% eindringen, sind es bei den anderen Materialien, die durch mehr oder weniger große Öffnungen mit dem Untergrund verbunden sind, bis zu 60%.

Tabelle 7: Wasserhaushaltskomponenten versiegelter Flächen in Berlin (Messperiode: April 1985 bis März 1986) (Wessolek 2001)

	Niederschlag		Abfluss		Versickerung		Verdunstung	
	mm	% _{Nd}	mm	Δ , % _{Nd}	mm	Δ , % _{Nd}	mm	Δ , % _{Nd}
Kunststeinplatten mit Mosaikpflaster (Gehweg)	631	100	104	16	319	51	208	33
Betonverbundsteine	631	100	103	16	379	60	149	24
Rasengittersteine	631	100	32	5	318	50	282	45
Straße (Asphalt)	631	100	455	72	51	8	126	20

Die potentielle Verdunstung (nach Haude) belief sich in dem angegebenen Zeitraum auf 650 mm

Eine stadtklimatisch außerordentlich wichtige Größe stellt die Verdunstung dar. Wie den Werten für die genannten Oberflächen entnommen werden kann, werden zwischen 20% (Asphalt) und maximal 45% (Rasengittersteine) des Jahresniederschlags verdunstet. Damit ist ein erheblicher Energieaufwand verbunden ($q_{v,w 20^\circ C} = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$), der für die Erwärmung der Atmosphäre ($L \uparrow$; Q_H) dann nicht mehr zur Verfügung steht. Ein Beispiel soll das verdeutlichen: Veranschlagt man für Berlin eine durchschnittliche Jahressumme der Strahlungsbilanz von $440 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, dann belaufen sich die für die Verdunstung (E) aufzuwendenden latenten Wärmeströme Q_E der Asphaltfläche (E = 126 mm) auf rund $85 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ und für die Rasengittersteinfläche (E = 282 mm) auf rund $191 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Entsprechend werden für die Asphaltfläche nur 19%, für die Oberfläche aus Rasengittersteinen hingegen 43% der Jahressumme der Strahlungsbilanz für die Verdunstung aufgewendet. Das bedeutet, dass über Straßen 81% der Strahlungsbilanz für die Lufterwärmung (Q_H) und den Bodenwärmestrom (Q_B), über Rasengittersteinen jedoch nur 57% der Jahresenergie hierfür zur Verfügung stehen. Die niedrigen Luft- und Strahlungstemperaturen über den verdunstungsaktiveren Flächen sind ein Beleg dafür.

Neben den klimatischen Auswirkungen spielen versiegelte oder teilversiegelte Oberflächen eine herausragende Rolle für die Grundwasserneubildung in Stadtökosystemen. Messungen innerhalb urbaner Flächennutzungen belegen, dass in Stadtgebieten mit erheblichen Unterschieden gerechnet werden muss. So können Versiegelungsmaterialien mit hohen Fugenteilen (Betonverbund- und Grasbetonsteine) sowie auf Böden aufgebrachte Verdunstungsperrschichten (z.B. Kies) höhere Grundwasserneubildungsraten aufweisen als freie Ackerflächen. Das liegt daran, dass einsickerndes Wasser durch die teilweise erfolgte Oberflächenversiegelung stärker gegen Verdunstung geschützt ist als unbedeckte natürliche Oberflächen (Wessolek 2001). Diese Ergebnisse zeigen, dass ein Stadtgebiet hinsichtlich der Grundwasserneubildungsrate sehr differenziert betrachtet werden muss.

3.1.2 Anthropogene Wärmestromdichten

Unter dem Begriff anthropogene Wärmeproduktion (Q_{anthr}) wird die aus dem Betrieb von Kraftfahrzeugen, Kraftwerken, Industrieanlagen und der Gebäudeklimatisierung (Heizen und Kühlen) resultierende thermische Emission verstanden. Gelegentlich wird hierunter auch die durch den Metabolismus der Organismen – in diesem Fall der Stadtbewohner – freigesetzte Wärme (Q_{Met}) subsumiert. Diese macht allerdings nur einen vernachlässigbaren Anteil an der Gesamtsumme von Q_{anthr} aus, wie folgende Abschätzung zeigt: Berücksichtigt man z.B. einen 'mittleren Aktivitätszustand' von etwa 200 Watt pro Person unter Berücksichtigung einer Großstadt mit 600.000 Einwohnern bei einer Stadtfläche von 200 km^2 , dann wird durch Q_{Met} eine mittlere flächenbezogene Wärmestromdichte von nur $0,6 \text{ W m}^{-2}$ erreicht. Das bedeutet, dass selbst hohe Einwohnerdichten in urbanen Gebieten nicht in der Lage sind, ausschließlich durch den Metabolismus verursachte, hohe, das thermische Stadtklima beeinflussende Werte zu erzielen. Für die Innenraumklimatologie, die hier nicht behandelt wird, stellt hingegen

die durch den menschlichen Stoffwechsel produzierte Wärme einen wichtigen Faktor dar, der bei der Gebäudeklimatisierung berücksichtigt wird.

Die auf technischen Prozessen beruhenden anthropogenen Wärmestromdichten können jedoch in Abhängigkeit vom Typus sowie von der geografischen Breite und topografischen Lage eines städtischen Siedlungskörpers sehr unterschiedliche Werte annehmen. So werden z.B. große Werte sowohl durch hohe Einwohnerdichten als auch durch hohen Pro-Kopf-Energieverbrauch verursacht (Tabelle 8). Auch stellen sich Tages-, Wochen- und Jahresgänge je nach Aktivität des Wirtschafts- und Privatlebens der Bevölkerung ein. Untersuchungen zum Tagesgang des Energieverbrauchs in verschiedenen nordamerikanischen Städten haben z.B. gezeigt, dass je nach geografischer Lage der Städte die anthropogenen Wärmestromdichten morgens und abends zwischen 25% und 50% höher sein können als das Tagesmittel (Sailor et al. 2003). Besonders hohe Q_{anthr} – Werte lassen sich im Allgemeinen in winterkalten Ballungsräumen beobachten, in denen ein großer Teil des Energieeinsatzes zur Gebäudeerwärmung benötigt wird. Effektive Wanddämmungen reduzieren allerdings den Energieverbrauch in erheblichem Maße. Aber auch für sommerheiße Siedlungsgebiete kann ein hoher Energieverbrauch nachgewiesen werden, der nicht nur zur Gebäudekühlung aufgewendet wird. So berichten Ichinose et al. (1999) über extrem hohe anthropogene Wärmestromdichten, die sie für den Innenstadtbereich von Tokio ermittelten. Hier lagen die Q_{anthr} – Werte tagsüber bei über 400 W m^{-2} und erreichten im Maximum sogar 1590 W m^{-2} , wobei mehr als die Hälfte dieser Wärmestromdichten allein auf den Warmwasserverbrauch von Hotels entfiel.

Energieeinsparungen beim Betrieb von Klimaanlage ergeben sich dann, wenn z.B. die Albedo der Gebäudeaußenfassaden und -dächer erhöht wird. Für helle Gebäude nordamerikanischer Städte konnte auf der Basis numerischer Modellsimulationen ein um bis zu 15% geringerer Energieverbrauch in den Sommermonaten gegenüber dunklen, die Sonnenstrahlung stark absorbierenden Gebäudehüllen nachgewiesen werden (Akbari et al. 1999).

3.1.3 Emission von Luftverunreinigungen

Die Luftqualität in Städten wird durch zahlreiche Emissionsquellen sowie durch die vom bodennahen atmosphärischen Austausch abhängige Transmission bestimmt. Wichtigste Verursachergruppen anthropogener gas- und partikelförmiger Luftbeimengungen sind der Kraftfahrzeugverkehr, Industrie und Gewerbe, Kraftwerke sowie öffentliche und private Gebäude, wobei Abhängigkeiten zum Industrialisierungsgrad, zur Wirtschaftsstruktur sowie zur geografischen und topografischen Lage der Ballungsräume bestehen. In einigen Ländern prägen darüber hinaus Emissionen, die der Biomasseverbrennung entstammen, sowie herantransportierter Staub aus Wüstengebieten (Indien, China) oder anderen winderosionsanfälligen Flächen die Luftqualität von Ballungsräumen. Zu den gegenwärtig wichtigsten Indikatoren der luftverschmutzten Stadtatmosphäre zählen NO , NO_2 , NO_x , CO , CO_2 , NMVOC , O_3 , SO_2 , Staub und Ruß. Tabelle 9 enthält für ausgewählte Sektoren Angaben zur Emissions-

Tabelle 8: Pro-Kopf-Energieverbrauch, Flussdichten der anthropogenen Wärmeproduktion (Q_{anthr}) und der natürlichen Strahlungsbilanz (Q^*) ausgewählter Städte (nach Zusammenstellungen aus Helbig 1987, Oke 1990, Steinecke 1999, Ichinose et al. 1999)

Stadt (geogr. Breite)	Jahr	Jahreszeit	Fläche km ²	Bevölkerung 10 ⁶ Einw.	Einwohnerdichte Einw./km ²	Pro-Kopf-Verbrauch GJ/Einw.	Q_{anthr} W m ⁻²	Q^* W m ⁻²	$\frac{Q_{anthr}}{Q^*} \cdot 100\%$
Fairbanks (64° N)	1965–70	Jahr	37	0,03	810	740	19	18	106
Reykjavík (64° N)	1992	Jahr	38	0,1	2.680	1.100	35	90	39
Sheffield (53° N)	1952	Jahr	48	0,5	10.420	58	19	56	34
Berlin (West) (52° N)	1967	Jahr	234	2,3	9.830	67	21	57	37
Vancouver (49° N)	1970	Jahr	112	0,6	5.360	112	19	57	33
Budapest (47° N)	1970	Jahr	113	1,3	11.500	118	43	46	93
		Sommer					32	100	–
		Winter					51	–	–
Montreal (40° N)	1961	Jahr	78	1,1	14.102	221	99	52	190
		Sommer					57	92	62
		Winter					153	13	1.177
Manhattan (40° N)	1967	Jahr	59	1,7	28.810	128	117	93	126
		Sommer					40	–	–
		Winter					198	–	–
Tokyo (35° N)	1989	Jahr	612	8,1	13.235	70	31	59	53
		Sommer					25	100	25
		Winter					40	17	235
Los Angeles (34° N)	1965–70	Jahr	3.500	7,0	2.000	331	21	108	19
Hongkong (22° N)	1971	Jahr	1.046	3,9	3.730	34	4	~ 110	4
Singapur (1° N)	1972	Jahr	568	2,1	3.700	25	3	~ 110	3

situation in Deutschland. Hiernach sind über 50% der NO_x-, fast 50% der CO- sowie beinahe 20% der NMVOC-Freisetzungen auf den Kfz-Verkehr zurückzuführen. Unter anderem dienen die letztgenannten Spurenstoffe als Vorläufergase des sich sekundär in der Atmosphäre bildenden O₃ (vgl. Teil 2, Abschnitt 1.6). Für die genannten Spurenstoffe (Ausnahme: Ozon) durch-

geführte Zeitreihenanalysen belegen – insbesondere für das vergangene Jahrzehnt – einen z.T. erheblichen Rückgang der Emissionen, was auf den Einbau wirksamer Filteranlagen in Abluftkaminen, auf eine Änderung des Energieverhaltens der Bevölkerung und auf die Einführung des Katalysators für Kraftfahrzeuge zurückzuführen sein dürfte (UBA 2002).

Tabelle 9: Emissionen ausgewählter Spurenstoffe nach verschiedenen Sektoren in Deutschland (vorläufige Angaben für 2001) (nach UBA 2002)

Spurenstoff	NO _x 1592 kt ¹⁾		CO 4797 kt		SO ₂ 650 kt		Staub 247 kt		NMVOC ³⁾ 1606 kt		CO ₂ 871 Mt ¹⁾	
	Kt	% ²⁾	kt	%	Kt	%	Kt	%	Kt	%	Mt	%
Kfz-Verkehr	835	52,4	2289	47,7	20	3,1	34	13,8	297	18,5	167	19,1
Industriefeuerungen ⁴⁾	189	11,9	658	13,7	150	23,1	6	2,4	7 ⁵⁾	0,4	135	15,5
Kraft- und Fernheizwerke	272	17,1	104	2,2	326	50,1	26	10,5	6	0,4	343	39,4
Haushalte	88	5,5	852	17,7	70	10,8	13	5,3	60	3,7	131	15,0

¹⁾ Jahressumme jeweils in kt (Kilotonnen) bzw. Mt (Megatonnen)

²⁾ relative Angaben beziehen sich auf entsprechende Jahressummen (ergeben nicht zwangsläufig 100 %, da nur ausgewählte Sektoren betrachtet wurden)

³⁾ NMVOC = Non Methane Volatile Organic Compounds (Nichtmethankohlenwasserstoffe, ohne natürliche Quellen)

⁴⁾ Ohne Industrieprozesse, die im Falle von Staub und NMVOC hohe Werte einnehmen

⁵⁾ Ohne Lösemittelverwendung, die an der Emission dieses Spurenstoffs zu 62 % beteiligt ist

Literatur

- Akbari H, Konopacki S, Pomerantz M (1999): Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States. *Energy* 24, 391–407
- Anandakumar K (1999): A study on the partition of net radiation into heat fluxes on a dry asphalt surface. *Atmospheric Environment* 33, 3911–3918
- Birg H (1996): Die Weltbevölkerung. Verlag CH Beck, München
- Eggert A W K (1999): Dreidimensionale SF₆-Tracergasmessung als Methodik zum Nachweis von lokalen Luftströmungen für die Planungsorientierte Stadtklimatologie. Reihe Umweltwissenschaft, Shaker Verlag Aachen, 173
- Ellefsen R (1990/91): Mapping and Measuring Buildings in the Canopy Boundary Layer in ten U.S. Cities. *Energy and Buildings* 15–16, 1025–1049
- Emeis S (2000): Meteorologie in Stichworten. Gebr. Bornträger Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 199
- Foken T (2003): Angewandte Meteorologie – Mikrometeorologische Methoden. Springer-Verlag Heidelberg, 289
- Groß G, Etling C (2003): Numerische Simulationsmodelle. *Promet* 30, Nr 1–2, 28–38
- Helbig A (1987): Beiträge zur Meteorologie der Stadtatmosphäre. *Abh. Meteorol. Dienst DDR*, Nr 137
- Helbig A, Baumüller J, Kerschgens M J (Hrsg) (1999): Stadtklima und Luftreinhalung. 2. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 467
- Houghton J T, Ding Y, Griggs, D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press New York, 1–881
- Howard L (1833): Climate of London deduced from meteorological observations. 3rd ed., London
- Hupfer P, Kuttler W (Hrsg) (1998): Witterung und Klima. 10. Aufl. B G Teubner, Stuttgart, Leipzig 413
- Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K (1999): Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment* 33, 3897–3909
- Kratzer A (1956): Das Stadtklima. 2. Auflage, 184. Vieweg, Braunschweig
- Kuttler W, Barlag A B, Rossmann F (1996): Study of the thermal structure of a town in a narrow valley. *Atmospheric Environment* 30, 365–378
- Kuttler W, Düttemeyer D (2003): Umweltmeteorologische Untersuchungsmethoden. *Promet* 30, Nr 1–2, 15–27
- Kuttler W, Wacker T (2001): Analyse der urbanen Luftqualität mittels mobiler Messungen. *Österr Beitr Meteorol Geophys* 27, Publ Nr 399, 1–16
- Landsberg H E (1979): Atmospheric changes in a growing community. *Urban Ecology* 4, 53–81
- Landsberg H E (1981): The Urban Climate. *Int Geophys Ser* 28, Academic Press New York, 275
- Larcher W (2001): Ökophysiologie der Pflanzen. 6. Aufl. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart, 408
- Lowry W P (1977): Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *J Appl Meteorol* 16, 129–135
- Manier G (1998): Luftschadstoffe – messen oder rechnen? *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 58, 221
- Matzarakis A (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas. *Ber Meteor Inst Univ Freib* 6, 267
- Matzarakis A, Mayer H (1992): Mapping of urban air paths for planning in Munich. *Wiss Ber Inst Meteor Klimafor Univ Karlsruhe* 16, 13–22
- Mayer H, Haustein Ch (1994): Air Pollution caused by motor-traffic in urban spaces. *Meteor Zeitschr N F* 3, 138–142
- Mayer H, Matzarakis A (2003): Zukunftsperspektiven der Umweltmeteorologie. *Promet* 30, Nr 1–2, 57–66
- Möller D (2003): Luft. Walter de Gruyter. Berlin, New York, 750
- Moriske H-J (2000): Aktive und passive Probenahmeverfahren. In: Moriske H-J, Turowski E (ab 1999 fortlaufend ergänzt): Handbuch für Bioklima und Lüfthygiene, Kap III-6.2.1, 1–18, ecomed verlag, Landsberg
- Oke T (1990). *Boundary Layer Climates*. 2nd ed. Routledge. London, 435
- Parlow E (2003): The urban heat budget derived from satellite data. *Geogr. Helvetica* 58, 2, 99–111
- Persson P (1997): Differential Nocturnal Cooling in the Landscape detected by Mobile Measurements. *Theor Appl Climat* 56, 215–224
- Reuter U, Hoffmann U (1998): Umweltmeteorologie. Vom Ergebnis zur Planung. *UVP-Report* 12, 5–6
- Sailor D J, Lu L, Fan H (2003): Estimating urban anthropogenic heating profiles and their implications for heat island development. Fifth Internat. Conf. Urban Climate, Lodz, Poland, 1–5 Sept, 2003, Book of Abstracts, 132
- Scherer D, Fehrenbach U, Beha H D, Parlow E (1999): Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmospheric Environment* 33, 4185–4193
- Steinecke K (1999): Urban climatological studies in the Reykjavik subarctic environment, Iceland. *Atmospheric Environment* 33, 4157–4162
- UBA (2002): Umweltdaten Deutschland. Umweltbundesamt, Berlin
- VDI 3787 Blatt 5 (2003): Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft. *VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft*, Bd 1b, Dez 2003, 85
- VDI 3787 Blatt 9 (2002): Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lüfthygiene in räumlichen Planungen. *VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft*, Bd 1b, Aug 2002, Gründruck, 39
- Weber S, Kuttler W (2003): Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und -qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 63, 9, 381–386
- Wessolek G (2001): Bodenüberformung und -versiegelung. *Handbuch der Bodenkunde*, 11. Erg. Lfg. 04/01, 1–29
- Wessolek G, Facklam M (1997): Standorteigenschaften und Wasserhaushalt von versiegelten Flächen. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 160, 41–46
- Wessolek G, Renger M (1998): Bodenwasser- und Grundwasserhaushalt. In: Sukopp H, Wittig R (Hrsg): *Stadtökologie*, 2. Aufl. Gustav Fischer. Stuttgart, Jena, 186–200
- Wienert U (2002): Untersuchungen zur Breiten- und Klimazonenabhängigkeit der urbanen Wärmeinsel. *Essener Ökologische Schriften* 16, 211
- Wilmers F (1976): Die Anwendung von Wettertypen bei ökologischen Untersuchungen. *Wetter und Leben*, 28, 224–235
- Yoshino M (1990/91): Development of urban climatology and problems today. *Energy and Buildings* 15–16, 1–10
- Zmarsly E, Kuttler W, Pethe H (2002): Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen. 2. Aufl. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart, 176

Eingegangen: 19. Dezember 2003

Akzeptiert: 01. März 2004

OnlineFirst: 09. März 2004

Univ.-Prof. Dr. Wilhelm Kuttler ist Leiter der Abteilung Angewandte Klimatologie des Instituts für Geographie der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, Vorsitzender des Fachausschusses Umweltmeteorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (Amtsperiode 2002–2005) und Obmann einer VDI Arbeitsgruppe, die eine Richtlinie zur Planungsrelevanz in der Umweltmeteorologie erarbeitet. Sein aktuelles Forschungsgebiet umfasst neben der Grundlagenforschung insbesondere anwendungsorientierte Aspekte der Stadtklimatologie. Im Vordergrund dieses Arbeitsbereiches stehen Untersuchungen über das Auftreten der städtischen Wärmeinseln, zum klimatischen und luft-hygienischen Einfluss urbaner Grünflächen auf die bebaute Umgebung sowie zum Kaltlufttransport zwischen Stadt und Umland.