

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 2: Phänomene und Wirkungen*

Wilhelm Kuttler

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

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2004.08.083>

Zusammenfassung

Teil 2 dieses Übersichtsartikels zur Stadtklimatologie beschäftigt sich mit der Ausprägung ausgewählter Klimatelemente in urbanen Räumen, der lufthygienischen Problematik in Städten sowie mit den human-biometeorologischen Aspekten der Stadtklimatologie. Es wird zunächst der Aufbau der Stadtatmosphäre und die städtische Strahlungs- und Wärmebilanz dargestellt. Anschließend werden der urbane Wärmeinseleffekt, das bodennahe Windfeld, die urbanen Luftfeuchtigkeitsverhältnisse und die Luftqualität exemplarisch erläutert. Planerische Möglichkeiten zur Verbesserung des Klimas in unseren Städten werden vorgestellt und ihre Wirksamkeit abgeschätzt. Zum Abschluss wird die Rolle des Stadtklimas innerhalb der aktuellen Diskussion rund um die Problematik der globalen Klimaentwicklung beleuchtet und anhand der Ergebnisse bisheriger Untersuchungen positioniert.

Schlagwörter: Anthropogene atmosphärische Spurenstoffe; anthropogene Niederschlagsmodifikation; anthropogene Wärme-flussdichten; human-biometeorologische Wirkungskomplexe; Klimatop; Stadtatmosphäre; Stadtklimaeigenschaften; urbane Energiebilanz; urbane Grenzschicht; Wärmeinsel

Abstract

Urban Climate. Part 2: Main Features and Effects

Part 2 of this article provides an overview of urban climatology and is concerned with the manifestations of selected climate elements in an urban environment, with air hygiene problems in cities and with human-biometeorological aspects of urban climatology. Initially, the structure of the urban atmosphere and urban radiation and energy balances are described. The article then deals with the urban heat island effect, the near-surface wind field, urban humidity conditions and the differences between towns and surrounding areas on the basis of examples. Planning possibilities for improving the climate in our cities are presented, together with an assessment of the effectiveness of the various measures. Finally, the role of the urban climate in the current discussion of global climate change problems is considered and placed in context on the basis of previous studies.

Keywords: Anthropogenic atmospheric trace substances; anthropogenic energy flux densities; anthropogenic modification of precipitation; climatope; human-biometeorological effective complexes; urban atmosphere; urban boundary layer; urban climate features; urban energy balance; urban heat island

Einleitung

Nachdem in Teil 1 (Kuttler 2004) die Voraussetzungen, Charakteristika und Nachweismethoden des Stadtklimas behandelt wurden, stellt Teil 2 ausgewählte stadtklimatische Phänomene vor und analysiert, welche Wechselwirkungen zwischen diesen und der urbanen Umwelt bestehen. Begonnen wird mit der Darstellung der Spezifika der urbanen Atmosphäre; anschließend wird die städtische Energiebilanz aufgegriffen und deren Auswirkungen auf die Lufttemperaturen untersucht. Danach erfolgt die Behandlung des bodennahen Windfeldes sowie der Veränderungen von Luftfeuchtigkeit und Niederschläge durch Städte. An die Schilderung der wichtigsten anthropogenen atmosphärischen Spurenstoffe schließt sich die Untersuchung der human-biometeorologischen Wirkungskomplexe an. Der Beitrag endet mit der Diskussion über die Möglichkeiten, stadtklimatische Prozesse zu beeinflussen und der Erörterung der Reaktion ausgewählter Stadtklimaparameter auf die globale Erwärmung.

* Teil 1: Grundzüge und Ursachen (erschien in UWSF Vol. 16, Nr. 3, S. 187–199, vgl. Kuttler 2004)

1 Aufbau der Stadtatmosphäre

Sowohl die Struktur und räumliche Anordnung von Gebäuden als auch die für Stadtgebiete typischen Stoff- und Energieströme führen zur Modifikation der Planetaren Grenzschicht (engl. Planetary Boundary Layer, PBL) im Siedlungsbereich.

Unter den klimatisch optimalen Verhältnissen einer wind-schwachen strahlungsreichen Wetterlage weist die Stadtatmosphäre eine vertikale Gliederung auf, die in **Abb. 1** stark generalisiert dargestellt ist.

Danach nimmt von der Bodenoberfläche bis zum mittleren Dachniveau die Stadthindernisschicht (engl. Urban Canopy Layer, UCL) den unteren Teil der sogenannten Stadtreibungsschicht (engl. Urban Roughness Sublayer, URS; vgl. **Abb. 1a, b**) ein. Die Strömung ist innerhalb der URS stark lokal geprägt und wird durch die Anordnung einzelner Rauigkeitselemente (**Abb. 1c**) charakterisiert (Rotach 1999). Oberhalb der URS nehmen diese Einflüsse auf das Strömungsfeld ab, so dass ein weitgehend homogenes Turbulenzfeld vorliegt. Den Abschluss nach oben bildet die städtische Mischung-

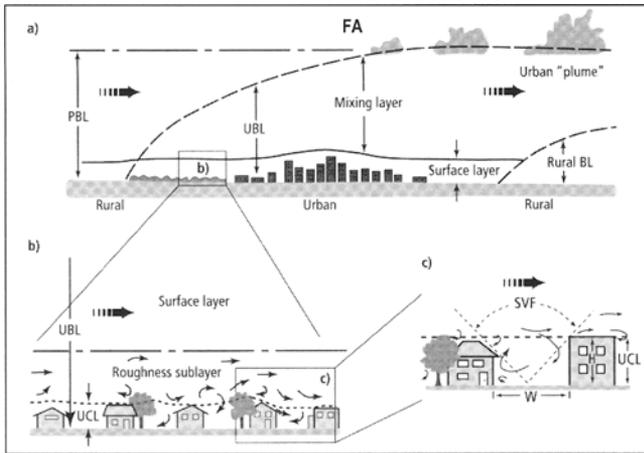


Abb. 1: Modifikation der Planetaren Grenzschicht (PBL) durch einen Stadtkörper nach Oke (1997). Erläuterung im Text

schicht (engl. Urban Mixing Layer, UML), deren Mächtigkeit vom Tagesgang abhängig ist und bis zu zwei Kilometer betragen kann. Hier schwindet allmählich der Einfluss der Schubspannung zugunsten der Zunahme von Gradient- und Corioliskraft. Erst in der freien Atmosphäre (engl. Free Atmosphere, FA), die über dem städtischen 'Störkörper' in einer größeren Höhe als über dem Umland beginnt, lässt sich ein Stadteffekt nicht mehr nachweisen.

2 Komponenten der stadtklimatischen Größen

2.1 Städtische Energiebilanz

Die urbane Energiebilanz setzt sich aus dem Strahlungs- und Wärmehaushalt zusammen (Gl. 1 und Gl. 2):

$$Q^* = K\downarrow - K\uparrow + L\downarrow - L\uparrow - L\uparrow_{refl} \quad (Gl. 1)$$

$$Q^* + Q_{anthr} + Q_{Met} + Q_H + Q_E + Q_B = 0 \quad (Gl. 2)$$

mit Q^* der Strahlungsbilanz, $K\downarrow$ der direkten (I) und diffusen (D) Globalstrahlung, $K\uparrow$ der kurzwelligen Reflexion (= $K\downarrow \cdot \alpha$), $L\downarrow$ der langwelligen atmosphärischen Gegenstrahlung, $L\uparrow$ der langwelligen Ausstrahlung, $L\uparrow_{refl}$ der langwelligen Reflexion (= $L\downarrow (1 - \epsilon)$), ϵ dem langwelligen Emissionsgrad, α der kurzwelligen Albedo sowie Q_{anthr} der anthropogenen Wärmeflussdichte, Q_{Met} der metabolischen Wärmeflussdichte, Q_H der turbulenten fühlbaren Wärmeflussdichte, Q_E der turbulenten latenten Wärmeflussdichte und Q_B der Bodenwärmeflussdichte. Die Einheiten der genannten Größen sind $W\ m^{-2}$, ϵ und α sind dimensionslos.

Insgesamt zeichnet sich die urbane Strahlungsbilanz dadurch aus, dass sich in Abhängigkeit von der Luftverschmutzung die kurzwelligen Strahlungsfussdichten im Vergleich zum Umland verringern (Kuttler und Schaefers 2000), diejenigen im langwelligen Bereich hingegen erhöhen. In summa resultieren daraus etwas niedrigere Werte für den versiegelten als für den nicht versiegelten Bereich. Zugleich ist die kurzwellige Albedo der oft durch dunkle Oberflächen und Mehrfachreflexionen im dreidimensionalen Baukörper geprägten Stadt geringer (vgl. Helbig et al. 1999).

Auf die langwellige effektive Ausstrahlung ($-L\uparrow + L\downarrow - L\uparrow_{refl}$) wirken sich neben der Höhe der Oberflächentemperaturen und der infrarotaktiven atmosphärischen Spurengase auch der Himmelssichtfaktor (engl. Sky View Factor, SVF; vgl. Abb. 1c) aus, der sich aus dem Quotienten der aktuellen Himmelssicht zum potentiell freien Himmel ergibt (Blankenstein und Kuttler 2004).

Die Wärmebilanz wird durch Q_H und Q_B dominiert. Da die Verdunstung eingeschränkt ist, sind die latenten Wärmeströme Q_E meist niedrig, wodurch Bowen-Verhältnisse ($Bo = Q_H/Q_E$; vgl. Teil 1, Abschnitt 2.1) von durchschnittlich > 1 erreicht werden. Auf den Beitrag von Q_{Met} wurde bereits in Teil 1, Abschnitt 3.1.2, eingegangen.

2.2 Städtische Überwärmung

Für die im Vergleich zum Umland höheren Luft- und Oberflächentemperaturen in Siedlungsgebieten ($\Delta T = T_{Stadt} - T_{Umland}$) wird der Begriff 'städtische Wärmeinsel' (engl. Urban Heat Island, UHI) verwendet. Deren Intensität ist Wetterlagen abhängig und zeigt darüber hinaus eine enge Bindung an die Tages- und Jahreszeit (Abb. 2).

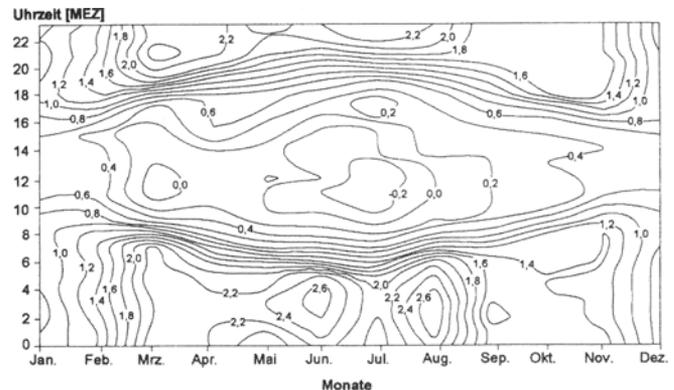


Abb. 2: Stündliche Differenzen der Lufttemperaturen (K) zwischen einer Innenstadt- und einer Freilandstation (ΔT_{S-U}) in der UCL (Großraum Düsseldorf; Messhöhe: 2 m ü. Gr.; Messperiode 1/93–1/94; nach Kuttler 1997)

Die größten UHI-Intensitäten treten erwartungsgemäß in Sommernächten auf, wobei sich die Wetterlagenabhängigkeit in der zellulär auftretenden Überwärmungsstruktur widerspiegelt. Im Vergleich zur Nacht ergeben sich zur Mittagszeit während aller Monate des Jahres keine oder nur schwach positive Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland (Parlow 2003). Grundsätzlich lassen sich für die Intensität der städtischen Wärmeinseln negative Abhängigkeiten zur Höhe der Windgeschwindigkeit und zum Wolkenbedeckungsgrad, positive Zusammenhänge hingegen zur stabilen Schichtung der Umlandatmosphäre erkennen. Neben den genannten meteorologischen Einflussgrößen steuern aber auch die urbanen Oberflächenbedeckungen sowie die meist an die Einwohnerzahl gekoppelte Stadtgröße die urbane Überwärmung (Abb. 3). Es zeigt sich, dass die Abhängigkeit der maximalen UHI von der Bevölkerungsdichte positiv ist ($0,74 < R^2 < 0,98$). Die verschiedenen Steigungsmaße der

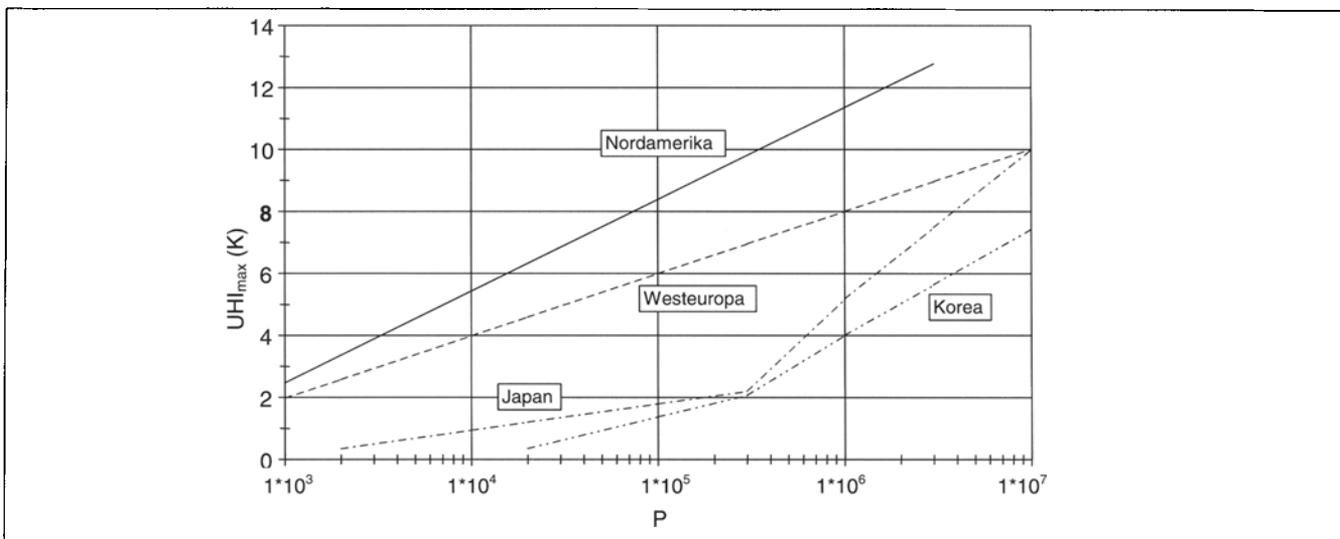


Abb. 3: Abhängigkeit der maximalen städtischen Wärmeinselintensität (K) vom Logarithmus der Stadtbevölkerung (P) für Städte in Nordamerika, Westeuropa, Japan und Korea (nach einer Zusammenstellung aus Matzarakis 2001)

Regressionsgeraden hängen mit den jeweiligen Bauweisen und landestypischen Wirtschaftsformen zusammen. Die extremen Unterschiede im Verlauf der Regressionsgeraden kleiner und großer asiatischer Städte dürften darauf beruhen, dass in kleineren Städten mehr Holz als Baumaterial verwendet wird, eine eher ländliche Lebensweise üblich ist und eine im Vergleich zu den Millionenstädten andere Flächennutzung im Umland vorherrscht.

2.3 Bodennahes Windfeld

Bebaute Gebiete zeichnen sich im Vergleich zum flachen Umland auch durch eine Modifikation des horizontalen und vertikalen Windfeldes aus. Die Gründe hierfür sind sowohl in der größeren Bodenreibung durch die urbanen Strömshindernisse als auch in der Beeinträchtigung des Luftdruckfeldes durch die städtische Wärmeinsel zu sehen. Zu den

Charakteristika der Luftströmung in Siedlungsgebieten zählen im Allgemeinen

- niedrigere Windgeschwindigkeiten,
- häufigeres Auftreten von Windstillen,
- höhere Anzahl an Schwachwindstunden,
- Zunahme der mechanischen und thermischen Turbulenz sowie der Böigkeit und
- eine durch die Feingliederung der Oberfläche vorgegebene, meist starke Beeinflussung der Windrichtungen als Folge der Kanalisierung durch Straßenschluchten.

Stadtbedingte Windgeschwindigkeitsabnahmen und typische Häufigkeiten von Schwachwindepisoden im Vergleich zum Umland sind für verschiedene Klimatope exemplarisch in Tabelle 1 enthalten.

Allerdings lassen sich während Strahlungswetterlagen bei ausgeprägter UHI innerstädtisch auch höhere Windgeschwindigkeiten als im Umland feststellen, was auf die durch den

Tabelle 1: (a) Mittlere stündliche Windgeschwindigkeiten (\bar{u}) sowie (b) Anzahl, Summe und maximale Dauer von Schwachwindepisoden ($\bar{u} \leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$) in verschiedenen Klimatopen der Stadt Düsseldorf (Messperiode: 1/93–1/94; Messhöhe: 4–6 m ü. Gr.; nach Kuttler 2000; verändert)

(a)	Freiland (Kuppe)	Vorort	Industriegebiet	Grünfläche	Innenstadt rheinfern	Innenstadt rheinnah	Gewerbegebiet	Aue
bezogen auf Freilandwert	100%	69%	60%	49%	57%	71%	54%	74%
\bar{u}	3,5 m s ⁻¹	2,4 m s ⁻¹	2,1 m s ⁻¹	1,7 m s ⁻¹	2,0 m s ⁻¹	2,5 m s ⁻¹	1,9 m s ⁻¹	2,6 m s ⁻¹
(b) Episodendauer (h)	Standorte wie oben mit Angabe der Häufigkeiten							
≤ 6	20	153	201	252	231	130	198	171
> 6 bis 9	17	68	54	82	104	66	71	82
10 bis 19	2	77	129	138	110	59	95	80
20 bis 29	1	7	17	23	13	3	22	8
30 bis 39	0	0	0	5	1	0	5	1
> 40	0	1	1	4	3	2	5	0
Summe:	40	306	402	504	462	260	396	342
Höchstdauer einer Schwachwindepisode (h)	22	42	42	60	45	71	74	31

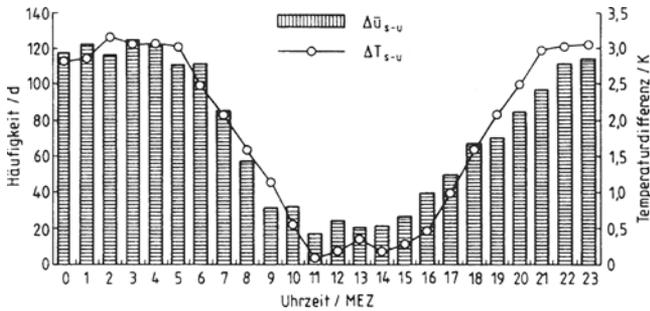


Abb. 4: Häufigkeit der positiven Windgeschwindigkeitsdifferenzen ($\Delta\bar{u}_{s-u}$) in Tagen als Funktion der diurnalen Wärmeinselintensität (ΔT_{s-u}) in Düsseldorf (Messperiode: 1/93–1/94; nach Hupfer und Kuttler 1998)

Wärmeineleffekt verursachte thermische Turbulenz im Siedlungsbereich zurückzuführen sein dürfte (Abb. 4).

Verfügt eine Stadt über geeignete Ventilationsbahnen (Mayer et al. 1994), die die Verbindung zum Umland herstellen (Weber und Kuttler 2003, Kuttler 2000), kann während derartiger Wetterlagen Umlandkaltluft über ein Lokalwindsystem dem Stadtkörper zugeführt werden (Barlag und Kuttler 1990/91).

2.4 Luftfeuchtigkeits- und Niederschlagsverhältnisse

Die städtischen Luftfeuchtigkeits- und Niederschlagsverhältnisse sind vor dem Hintergrund der in Gl. 3 dargestellten urbanen Wasserbilanz zu sehen, die sich in der Fassung von Helbig (1987) aus folgenden Einzelgliedern zusammensetzt:

$$P + F + W + ET + \Delta R + \Delta S + \Delta A = 0 \quad (Gl. 3)$$

mit P dem Niederschlag, F der Wasserfreisetzung durch Verbrennungsprozesse, W der kanalisiertem Wasserzufuhr aus Flüssen oder Staubecken, ET der Evapotranspiration, ΔR dem Nettoabfluss, ΔS der Nettowasserspeicherung und ΔA

der Nettofeuchteadvektion. Für die genannten Größen gilt die Einheit mm Zeiteinheit⁻¹.

Von den hier genannten Quellen- und Senkentermen werden F und W durch den Menschen im wesentlichen direkt beeinflusst, während ET, ΔR und ΔS über den Anteil der versiegelten Fläche beziehungsweise durch die Oberflächenverdichtung einer eher indirekten anthropogenen Steuerung unterliegen.

2.4.1 Luftfeuchtigkeit

Die urbanen Luftfeuchtigkeitsverhältnisse werden exemplarisch für drei Standorte im Großraum München dargestellt, die für die Wohngebietssituation und die Aufenthaltsdauer der Bewohner als typisch angesehen werden können (Mayer et al. 2003). Bei den Standorten handelt es sich um:

- Stadtzentrum, Innenhof (SVF = 0,25; Versiegelungsanteil der Umgebung: 80%)
- Stadtzentrum, Park (SVF_{Sommer} = 0,15; SVF_{Winter} = 0,65; Versiegelungsanteil der Umgebung: 20%)
- Stadtrand, Grünfläche (kurz gehaltener Rasen, SVF_{Sommer} = 0,55; SVF_{Winter} = 0,80; Versiegelungsanteil der Umgebung: 5%).

Die Luftfeuchteverhältnisse werden als städtischer Feuchteüberschuss (engl. Urban Moisture Excess, UME) auf der Basis der Dampfdruckdifferenzen zwischen Stadtzentrum (Innenhof) und Stadtrand (Grünfläche) ($\Delta e = e_{\text{Stadtzentrum}} - e_{\text{Stadtrand}}$) für einen mittleren Tagesgang im Sommer und Winter dargestellt. Wie Abb. 5a zeigt, weist der urbane Feuchteüberschuss UME im Sommer einen gut strukturierten, im Winter (Abb. 5b) hingegen kaum einen Tagesgang auf. Darüber hinaus besteht ein mehr oder weniger enger Zusammenhang zu den UHI-Werten, auf die jedoch nicht weiter eingegangen werden soll.

Im Sommer (vgl. Abb. 5 a) ergeben sich zwei Maxima positiver Feuchtedifferenzen, die durch Minima morgens (8 Uhr) und abends (20 Uhr) voneinander getrennt sind. Dabei ist

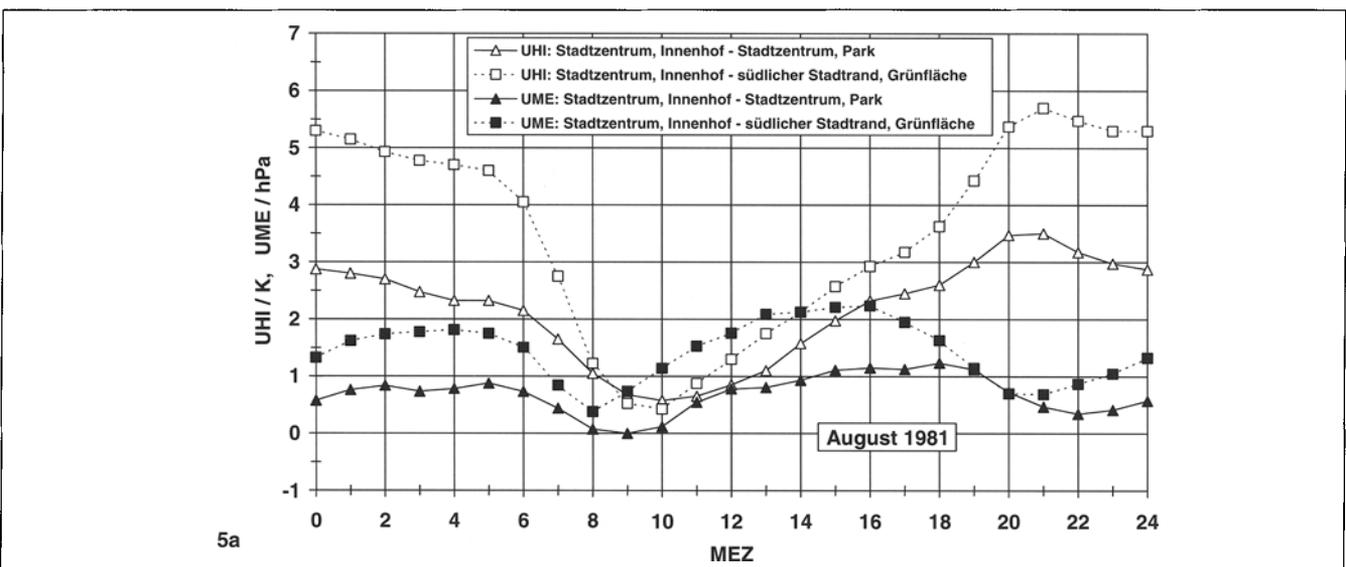


Abb. 5a: Mittlere Tagesgänge der urbanen Feuchteinsel UME und der urbanen Wärmeinsel UHI im Großraum München in 2 m Höhe ü. Gr. im August (Mayer et al. 2003)

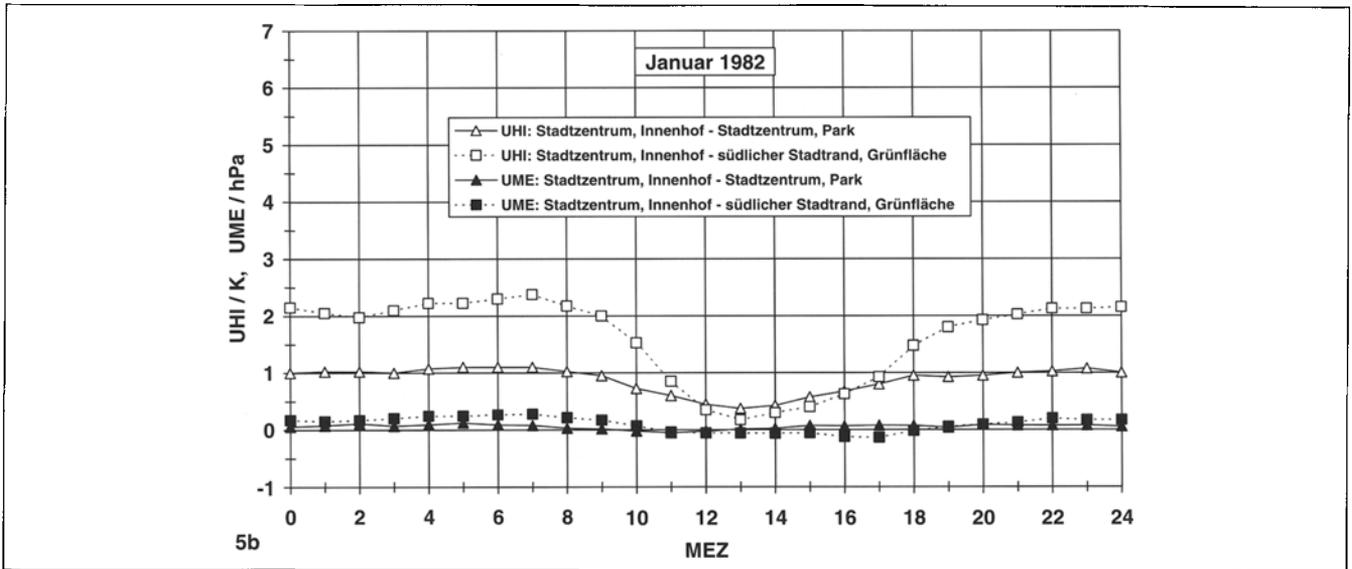


Abb. 5b: Mittlere Tagesgänge der urbanen Feuchteinsel UME und der urbanen Wärmeinsel UHI im Großraum München in 2 m Höhe ü. Gr. im Januar (Mayer et al. 2003)

die Ausbildung des Tagesganges im Wesentlichen auf die relativ starken diurnalen Feuchteschwankungen des Umlandstandortes zurückzuführen. Während im Umland zum Beispiel die Luftfeuchtigkeit morgens (zwischen 4 Uhr und 8 Uhr) hohe Werte aufweist, ändert sich die Luftfeuchtigkeit am Innenstadtstandort während dieses Zeitabschnittes kaum. Erst nach 8 Uhr nimmt die Luftfeuchtigkeit am Umlandstandort deutlich ab, während sie sich im Stadtzentrum leicht erhöht und erst wesentlich später und auch langsamer dort wieder niedrigere Werte annimmt. Die im Vergleich zum Innenstadtstandort größere Tagesamplitude im Umland dürfte auf die hier wesentlich stärker einflussnehmenden Faktoren der bodennahen atmosphärischen Schichtungs- und damit Austauschverhältnisse zurückzuführen sein als im Stadtzentrum. Während im Umland morgens bei noch stabiler Schichtung die einsetzende Evapotranspiration zuerst einmal für einen Anstieg der Luftfeuchtigkeit sorgt, nimmt diese nach 8 Uhr durch die beginnende Konvektion ab. Abends steigt der Dampfdruck in der bodennahen Umlandatmosphäre bei zunehmender Stabilisierung trotz abnehmender Evapotranspiration zunächst wieder an, um dann nachts endgültig niedrige Werte durch weiter nachlassende – letztendlich eingestellte – Verdunstung und eventuell Tauabsatz zu erreichen. Die Luftfeuchtigkeit am Innenstadtstandort unterliegt hingegen nur geringen Tagesschwankungen, da die atmosphärischen Schichtungsverhältnisse hier nur schwachen Unterschieden ausgesetzt sind und – wegen der höheren Temperaturen – die Evapotranspiration auch nachts wirksam sein kann.

Auf der Basis der vorgenannten mittleren Ergebnisse bleibt festzustellen, dass es in der Stadt im Sommer feuchter ist als im Umland, während im Winter die Unterschiede zwischen beiden Standorten verschwinden. Differenziertere Ergebnisse liegen bei ausschließlicher Analyse der Luftfeuchteverhältnisse während Strahlungswetterlagen vor. Bei Vorherrschen dieser Witterung ist die Stadtatmosphäre tagsüber trockener und nachts feuchter als das Umland (Tapper 1990).

Die Gründe, die zum städtischen Feuchteüberschuss UME führen, dürften allgemein darauf beruhen (Mayer et al. 2003), dass

- wegen der urbanen Wärmeinsel UHI auch nachts Verdunstung auftreten kann,
- es in der Stadt nachts seltener und schwächer ausgeprägt zu Tauabsatz kommt als im Umland,
- in der UBL nachts vom Umland feuchtere Luft über die Advektion in die Stadt transportiert werden kann, wo durch turbulenten Luftmassenaustausch zwischen UBL und UCL der oberflächennahen Schicht Feuchtigkeit zugeführt wird und
- in der Stadt durch verschiedene technische Prozesse Wasser freigesetzt wird und dieses in die Atmosphäre gelangt.

2.4.2 Niederschlagsverhältnisse

Auch für die urbanen Niederschlagsverhältnisse liegt bisher – trotz verschiedentlich durchgeführter großer Messkampagnen (vgl. Lowry 1998) – zu wenig Datenmaterial vor, um ein abschließendes Bild in Bezug auf dieses Klimaelement in Stadtgebieten zu zeichnen. Generell wird davon ausgegangen, dass Stadtgebiete die Entstehungsprozesse und die räumliche Verteilung insbesondere von sommerlichen Konvektionsregen beeinflussen, jedoch selbst keinen oder nur geringen zusätzlichen Niederschlag erzeugen. Grundsätzlich werden drei Prozesse unterschieden, die auf die urbane Niederschlagsstruktur Einfluss nehmen. Allerdings lässt sich der jeweilige Anteil der genannten Faktoren am Ergebnis des Gesamtprozesses nicht immer eindeutig ermitteln. Als niederschlagsverändernde Faktoren durch Stadtgebiete ergeben sich nach Schütz (1995):

- Beeinflussung der Wolkdynamik durch den Wärmeiseleffekt und die städtische Oberflächenrauigkeit,
- Eingriffe in wolkenphysikalische Prozesse durch Partikelemission aus verschiedenen Quellen und
- Modifizierung der Grenzschichtprozesse durch rauigkeitsbedingte Tropfenablenkung im bodennahen Windfeld.

Im Einzelnen resultiert daraus folgendes: Die städtische Wärmeinsel und die Rauigkeit verursachen sowohl ein Anheben als auch Umfließen der auf eine Stadt zuströmenden Luft. Dadurch kommt es zu lateraler Konvergenz in Lee, die durch vertikale Divergenz ausgeglichen wird.

Die Eignung von Partikeln als Wolkenkondensationskerne, die urban-industriellen Gebieten entstammen, hängt von ihrer Größe und Oberflächenbeschaffenheit ab. Atmosphärische Spurenstoffe, die aus löslichen oder oberflächenaktiven Stoffen bestehen und die sich Partikeln anlagern, können ebenfalls die Niederschlagsbildung beeinflussen (Möller 2003). Die Veränderung der Größenspektren und oberflächenchemischen Eigenschaften kann erheblich die Kondensationsfähigkeit der Atmosphäre beeinflussen.

Von den hier genannten Einflussgrößen, die für die urbane Niederschlagsmodifikation als wesentlich angesehen werden, weist die städtische Überwärmung offenbar den größten Einfluss auf (Landsberg 1981, Braham et al. 1981, Schütz 1996). Im Gegensatz zu den genannten niederschlagsverstärkenden oder sogar -auslösenden Faktoren ergab eine Analyse satellitengestützter Auswertungen von Abluftfahnen großer Ballungsräume (Rosenfeld 2000), dass industriell verschmutzte Luft mit $r < 14 \mu\text{m}$ offensichtlich wesentlich kleinere Partikeln enthält als natürliche Wolken mit Kondensationskerngrößen $r > 25 \mu\text{m}$. Die kleineren Partikeln sollen die Nukleation stark hemmen beziehungsweise letztlich sogar unterbinden, wodurch eine Regentropfenentstehung verhindert oder zumindest eingeschränkt wird. Das würde bedeuten, dass Städte oder Industriegebiete eher zu einer Unterdrückung der Niederschlagsbildung führen, anstatt diese zu verstärken. Es bleibt abzuwarten, ob die aus den genannten Satellitenmessungen gezogenen Schlüsse auch durch Daten entsprechender Niederschlagsmessnetze bestätigt werden können, was allerdings sehr aufwändig ist. Zudem kommt eine andere, ebenfalls satellitengestützte neuere Analyse des Niederschlagsaufkommens in der Umgebung nordamerikanischer Städte zu einem gegenteiligen Ergebnis (Shepherd et al. 2002).

Auch die Verteilung der festen Niederschläge wird durch Stadtgebiete beeinflusst. So ist zum Beispiel die Zahl der Tage mit einer Schneedecke gegenüber dem Umland gelegentlich reduziert. Dies wird unter anderem auf den Wärmeinseleffekt und die Schneeräumung zurückgeführt. Zusammen mit dem höheren Anteil vertikaler, nicht schneebedeckter Flächen und der schnelleren Verschmutzung der urbanen Schneedecke bewirkt dies während der betreffenden Wetterlagen deutliche

Unterschiede der kurzwelligen Albedo zwischen Stadt und Umland, wodurch der Wärmeinseleffekt unterstützt wird (Mayer und Noack 1980).

Wesentlich eindeutiger als die Beeinflussung von Niederschlägen durch große Siedlungsgebiete ist das Auftreten räumlich meist eng begrenzt und gelegentlich auftretender so genannter 'Stadt- oder Industrieschneefälle' (Harlfinger et al. 2000), die bisher beispielsweise in Berlin, Mannheim, Freiburg/Brsg., Basel, Bern und Graz nachgewiesen werden konnten. Diese anthropogenen Schneefälle, die auf wenigen Quadratkilometern zu einer Schneedecke von mehreren Zentimetern führen können, werden durch Wasserdampfemittenten (Industrieemissionen, Kühlturmfahnen) ausgelöst. Sie treten überwiegend in den frühen Morgenstunden bei Vorherrschen antizyklonaler Wetterlagen, stark ausgebildeter Temperaturinversion in den unteren Atmosphärenschichten, hoher Luftfeuchtigkeit und geringer Windgeschwindigkeit auf.

2.5 Luftqualitätssituation

Die Luftverschmutzung von Städten stellt ein weltweites Problem dar (vgl. Teil 1, Abschnitt 3.1.3). Luftverunreinigungen unterliegen nach ihrer Emission der atmosphärischen Transmission. Die Höhe der Luftverschmutzungskonzentrationen weist zeitliche und räumliche Abhängigkeiten auf, die allerdings nicht nur meteorologisch gesteuert sind (Möller 2003).

Die bodennahe Immissionssituation soll am Beispiel eines großen mitteleuropäischen Ballungsraumes (Rhein-Ruhr-Gebiet) an repräsentativen Luftverschmutzungsindikatoren erläutert werden (Tabelle 2).

Das hier aufgeführte SO_2 , das jahrzehntelang zu den dominierenden Luftverunreinigungen dieses Raumes zählte, spielt als nunmehr 'klassisch' zu bezeichnender Spurenstoff wegen seines niedrigen Konzentrationsniveaus für die Kennzeichnung der Luftqualität keine Rolle mehr. Auch die anderen Spurenstoffe weisen mittlerweile Durchschnittswerte auf, die – bis auf den 98%-Wert von Staub – zu keinen Überschreitungen der entsprechenden Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit (22. BImSchV vom 11.09.2002) führen. Für die Verkehrsstandorte ergibt sich jedoch ein et-

Tabelle 2: Jahresmittelwerte (\bar{x}) und 98%-Werte^{a)} ausgewählter atmosphärischer Spurenstoffkonzentrationen für das Rhein-Ruhr-Gebiet^{b)} sowie Verkehrs^{c)}- und Waldstationen^{d)} (Messperiode: 1999–2002; nach Landesumweltamt NRW) (– = keine Messung)

Spurenstoff	Rhein-Ruhr-Gebiet		Verkehrsstationen		Waldstationen	
	\bar{x}	98%-Wert	\bar{x}	98%-Wert	\bar{x}	98%-Wert
SO_2 ^{e)} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	8	30	8	25	5	8
SST ^{f)} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	38	87	47	102	24	59
NO^g) ($\mu\text{g m}^{-3}$)	17	125	48	195	4	8
CO^h) (mg m^{-3})	0,4	1,4	0,8	2,4	–	–
NO_2 ⁱ⁾ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	31	68	46	88	11	38
O_3 ^{j)} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	34	115	–	–	58	126

^{a)} 98%-Wert: Die dargestellten Werte werden nur von 2% aller Messwerte überschritten.

^{b)} Mittelwerte von 37 Stationen (Bonn bis Wesel und Unna bis Krefeld), ohne Verkehrsstationen und Sondermessstationen.

^{c)} Mittelwerte der Messstationen Düsseldorf-Mörsenbroich und Essen-Ost

^{d)} Mittelwerte der Messstationen Eggegebirge, Eifel und Rothaargebirge

^{e)} Mittelwerte aus Halbstundenmittelwerten berechnet, Temperaturbezug 20°C

^{f)} SST = Schwebstaub; Mittelwerte aus Tagesmittelwerten berechnet, Temperaturbezug 0°C

^{g)} Mittelwerte aus Stundenmittelwerten berechnet, Temperaturbezug 20°C

was anderes Bild: Im Vergleich zum 'Gebietsmittel Rhein-Ruhr' resultiert eine zum Teil erheblich höhere Belastung insbesondere durch NO (um den Faktor 2,6 höher), CO (2,0) und NO₂ (1,5). Grenzwertüberschreitungen werden an Straßen sowohl für NO (Jahresmittelwert) als auch für Schwebstaub (Jahresmittel- und 98%-Wert) nachgewiesen. Größendifferenzierte Messungen des Feinstaubes (PM_{2,5} und PM₁₀) weisen als Verursacher auch den Straßenverkehr aus, der sowohl direkt durch die Emission von Ruß (kleinere Partikeln) als auch indirekt durch die Aufwirbelung von Straßenstaub (größere Partikeln) daran beteiligt ist. Entsprechende Grenzwertüberschreitungen stellen vielerorts ein Problem dar.

Im Vergleich zu den genannten 'Gebietsmittelwerten' sind die Konzentrationen in den so genannten Reinluftgebieten ('Waldstandorte') des Rhein-Ruhr-Raumes bis auf das Ozon erwartungsgemäß niedrig. Die deutlich höheren Ozonkonzentrationen sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen: Einerseits auf das in unbelasteter Luft häufig anzutreffende höhere NO₂/NO-Verhältnis (hier: 2,8), das vergleichsweise im Ballungsraum nur den Wert von 1,8 erreicht, wodurch der wesentlich geringere Einfluss des ozonabbauenden NO in Waldgebieten verdeutlicht wird. Andererseits werden von Pflanzen bei hoher Einstrahlung biogene Kohlenwasserstoffe (Terpene, Isopren) freigesetzt (Wildt et al. 2001, Straßburger 2004), die die Konzentrationen an Ozonvorläufergasen erhöhen. In lufthygienisch belasteten Gebieten weisen die Ozonkonzentrationen einen vom Sonnenstand und der Temperatur abhängigen ausgeprägten Tagesgang auf, der durch ein nächtliches Minimum und ein frühnachmittägliches Maximum charakterisiert ist. Gelegentlich jedoch kann das Nachtminimum durch Auftreten eines Sekundärmaximums unterbrochen sein (Reitebuch et al. 2000). In Reinluftgebieten hingegen lassen die Ozonkonzentrationen nur eine geringe Abhängigkeit vom Tagesgang erkennen und verharren während sommerlichen Strahlungswetters auf einem weitgehend hohen Konzentrationsniveau (Kuttler und Zmarsly 1995).

3 Human-biometeorologische Aspekte

Die Messergebnisse stadtklimatischer Größen sind für den anwendungsbezogenen Bereich nur dann zu verwerthen, wenn diese unter anthropozentrischen Gesichtspunkten einer Beurteilung unterzogen werden, um begründet klimatisch-lufthygienische Gunst- von Ungunsträumen unterscheiden zu können (vgl. Teil 1, Abschnitt 2.3). Hierfür kann auf verschiedene human-biometeorologische Bewertungsmöglichkeiten zurückgegriffen werden, durch die normierte Aussagen zu den drei Wirkungskomplexen (photoaktinisch, thermisch, lufthygienisch) gemacht werden können. Auf darüber hinausgehende gesundheitliche Beeinträchtigungen wie Lärm, Gerüche oder starken Wind, die in Einzelfällen durchaus bedeutend sein können, wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

3.1 Photoaktinischer Wirkungskomplex

Eine strahlungsklimatische gesundheitliche Beeinträchtigung des Menschen, insbesondere durch hohe UV-Strahlungsstromdichten (im Spektralbereich 100 nm < λ < 400 nm) dürfte unter den gegenwärtigen mitteleuropäischen Klimaverhältnissen noch kein spezifisch urbanes Problem darstel-

len. Das könnte sich jedoch ändern, wenn es vor dem Hintergrund einer weiteren Abnahme der stratosphärischen Ozonkonzentrationen zu einem Anstieg der erythemauslösenden beziehungsweise melanominduzierenden ultravioletten Strahlung kommt.

Anders als bei den weiter unten zu besprechenden Wirkungskomplexen liegt bei der UV-Bestrahlung zwar im Vergleich zum Umland für den Menschen grundsätzlich keine ungünstigere Situation in der Stadt vor, jedoch bedingt die hier höhere Dichte sich im Freien aufhaltender Personen eine besondere Verantwortung sowie Möglichkeiten, durch planerische Maßnahmen für Beschattung (Bäume, Überdachungen, Arkaden etc.) zu sorgen. Daher wird auf diesen Komplex im Folgenden kurz eingegangen.

Zur einfachen Anwendung eines Qualitätsanzeigers für die ultraviolette Strahlung wurde ein UV-Index (UVI) für den in Deutschland am häufigsten auftretenden Hauttypen II (blond, hellhäutig) eingeführt (Gl. 4), mit dessen Hilfe die Strahlungsbelastung und die Möglichkeit des Auftretens eines Sonnenbrandes abgeschätzt und darüber hinaus – bei Überschreitung der Expositionszeiten – Schutzmaßnahmen empfohlen werden können (Staiger et al. 1997). Der UVI lautet:

$$UVI = E_{er} \cdot 40 \text{ W}^{-1} \text{ m}^2 \quad (\text{Gl. 4})$$

mit E_{er} der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke (W m^{-2}) und $40 \text{ W}^{-1} \text{ m}^2$ als empirischem Faktor.

Durch die Faktorenmultiplikation in Gl. 4 wird sichergestellt, dass der Wertebereich des UVI zwischen 0 (Minimum) und 12 (höchste Belastung) liegt. Der Term E_{er} kann zum Beispiel nach den von der Strahlenschutzkommission (SSK 1995) gemachten Vorgaben berechnet werden. Danach weisen UVI-Werte von 1 eine niedrige Belastung auf, bei der ein Sonnenbrand für die genannten Hauttypen unwahrscheinlich ist und Schutzmaßnahmen demzufolge nicht erforderlich sind. Bei Index-Werten von mehr als 8 ist die Belastung allerdings als sehr hoch einzustufen, ein Sonnenbrand beispielsweise in weniger als 20 Minuten möglich und Schutzmaßnahmen unbedingt zu empfehlen. In Deutschland können an strahlungsreichen Sommertagen UVI-Werte von bis zu 8 erreicht werden. Der UVI wird zum Beispiel vom Deutschen Wetterdienst berechnet und findet über die tägliche Routinevorhersage in den Medien Verbreitung, so dass von der Bevölkerung eigenverantwortlich Vorsorge vor zu starker Sonnenstrahlung getroffen werden kann. Flächenbezogen berechnete UVI-Werte können von Seiten der Stadtplanung dazu herangezogen werden, öffentliche Freiflächen in Abhängigkeit von der Nutzung und der Aufenthaltsdauer der Bevölkerung durch bauliche Maßnahmen und Beschattung durch großkronige Bäume zukünftig vor zu starker Sonnenstrahlung zu schützen.

3.2 Thermischer Wirkungskomplex

Zahlreiche epidemiologische Studien belegen den statistisch positiven Zusammenhang zwischen Mortalitäts-/Morbiditätsraten und thermischer Belastung (z.B. Kan et al. 2003, Jendritzky et al. 2004). Zur Bewertung des thermischen

Tabelle 3: Zuordnung von PMV-, PET- und pt-Schwellenwerten zu gleichem thermischen Empfinden und entsprechender physiologischer Belastungsstufe^{a)} (kombiniert nach verschiedenen Verfassern; aus Kuttler 1999)

PMV	PET	pt	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
-3,5	4°C	-39°C	sehr kalt	extreme Kältebelastung
-2,5	8°C	-26°C	kalt	starke Kältebelastung
-1,5	13°C	-13°C	kühl	mäßige Kältebelastung
-0,5	18°C	0°C	leicht kühl	schwache Kältebelastung
± 0	20°C	20°C	behaglich	keine Wärmebelastung
0,5	23°C	26°C	leicht warm	schwache Wärmebelastung
1,5	29°C	32°C	warm	mäßige Wärmebelastung
2,5	35°C	38°C	heiß	starke Wärmebelastung
3,5	41°C		sehr heiß	extreme Wärmebelastung

^{a)} Die Festlegung der Schwellenwerte erfolgte jeweils auf Basis der unterschiedlichen Definitionen der Eingangsgrößen; siehe hierzu Kuttler (1999)

Milieus stehen verschiedene Kenngrößen zur Verfügung, die im wesentlichen auf der Energiebilanz des Menschen (Gl. 5; hier in der Fassung von Höpfe 1984) beruhen.

$$M + W + Q^* + Q_H + Q_L + Q_{SW} + Q_{Re} + Q_N + Q_S = 0 \quad \text{Gl. 5}$$

mit M dem Gesamtenergieumsatz, W der mechanischen Leistung (Arbeitsleistung nach außen), Q^* der Strahlungsbilanz, Q_H dem turbulenten Fluss fühlbarer Wärme, Q_L dem turbulenten Fluss latenter Wärme infolge epidermaler Wasserdampfdiffusion ohne Schweißdrüsenbeteiligung (Perspiratio insensibilis), Q_{SW} dem turbulenten Fluss latenter Wärme durch Schweißverdunstung, Q_{Re} dem Atemwärmefluss, Q_N dem fühlbaren Wärmefluss durch Anpassung von Nahrung an die Körperkerntemperatur und Q_S dem Speicherwärmefluss durch Veränderung der Körpertemperatur. Für die genannten Größen gilt die Einheit W Person⁻¹.

Unter Berücksichtigung der Energiebilanz des Menschen wurden verschiedene anwendungsorientierte Bewertungsmethoden entwickelt (VDI 1998). Unter anderem handelt es sich hierbei um: Den so genannten PMV (engl. Predicted Mean Vote = mittlerer vorhergesagter Wert), die Physiologisch Äquivalente Temperatur (engl. Physiological Equivalent Temperature, PET) und die gefühlte Temperatur (engl. perceived temperature, pt).

Der PMV ist ein gruppenbezogener psycho-physischer Wert, der rangmäßig denjenigen Prozentsatz einer Probandengruppe angibt, der sich bei Exposition der jeweiligen thermischen Bedingungen subjektiv unbehaglich fühlt. Das daraus hervorgehende Klima-Michel-Modell (KMM, Jendritzky et al. 1990) kann für einen 'Norm-Menschen' unter Berücksichtigung verschiedener bekleidungsabhängiger, meteorologischer und geografischer Eingangsgrößen die thermische Behaglichkeit berechnen und anhand einer von -4 (sehr kalt) über 0 (behaglich) bis + 4 (sehr heiß) reichenden Skala eine entsprechende Wertungsklassifizierung vornehmen.

Im Gegensatz zum PMV stellt der PET eine Bewertungsmöglichkeit dar, die mit der Maßeinheit Grad Celsius versehen wurde, um beim Anwender Verständnisschwierigkeiten auszuschließen, die sich eventuell bei der Verwendung abstrakter Größen – wie beim PMV – einstellen. Während für die Berechnung des PMV die außenklimatischen Bedingungen zugrunde gelegt werden, bezieht der PET die außenklimatischen Verhältnisse auf ein Innenraumklima mit vorgegebenem Dampfdruck und unveränderlichen Isolationswerten der Bekleidung

einer sitzenden Standardperson, die einer leichten Bürotätigkeit nachgeht (Höpfe und Mayer 1987).

Die gefühlte Temperatur (pt) schließlich verwendet ebenfalls die Maßeinheit Grad Celsius und simuliert Außenbedingungen mit sich den aktuellen Verhältnissen anpassenden Wasserdampfdrücken und entsprechenden Isolationswerten der Bekleidung, um den permanenten thermischen Komfort einer spazierengehenden Standardperson zu gewährleisten.

Eine Zuordnung von PMV-, PET- und pt-Werten zu dem entsprechenden thermischen Empfinden und der daraus abgeleiteten physiologischen Belastung enthält **Tabelle 3**, unter jeweiliger Berücksichtigung der entsprechenden Definition und Eingangsgrößen.

Mit Hilfe dieser Größen sind flächendeckende Aussagen zum thermischen Wirkungskomplex möglich.

3.3 Lufthygienischer Wirkungskomplex

Unter dem lufthygienischen Wirkungskomplex wird der Einfluss der in der Atmosphäre enthaltenen Luftinhaltsstoffe auf die menschliche Gesundheit verstanden. Eine Bewertung der Wirkung ist weitgehend in verschiedenen Regelwerken und Gesetzen festgelegt. Unterschieden werden in diesem Zusammenhang

- Genehmigungs- und Schutzstandards, in denen die Grenzen nicht mehr zumutbarer Umweltbelastung im Sinne von § 3 Abs. 1 BImSchG bestimmt werden,
- Wirkungsstandards, die wirkungsbezogene Werte für Mensch, Tier und Pflanze enthalten und
- Vorsorge- und Planungsstandards, die über den Weg einer politischen Entscheidung auch regional unterschiedlich verbindlich gemacht werden.

Die hieraus resultierenden Kriterien weisen allerdings zahlreiche Mängel auf, die mit Mayer (1990) wie folgt zusammengefasst werden können:

Nicht für alle Spurenstoffe existieren Grenzwerte. Auch wird die Kombinationswirkung verschiedener gleichzeitig auftretender Spurenstoffe kaum berücksichtigt. Darüber hinaus beziehen sich die meisten der genannten Bewertungskriterien grundsätzlich auf die Durchschnittsbevölkerung und schließen gesundheitlich labile Gruppen (z. B. Kleinkinder, alte Menschen) weitgehend aus. Auch wird mit diesen Standards der Mobilität und damit der Aufenthaltsdauer der Stadtbewohner kaum Rechnung getragen, das heißt, die entsprechende Dosis von Luftinhaltsstoffen, der die Menschen in zeitlicher Abhängigkeit ausgesetzt sind, wird für die Bewertung vernachlässigt.

Die summarische Bewertung städtischer Luftverunreinigungen spielt eine wichtige Rolle bei planerischen Entscheidungsprozessen. Zwar lässt sich eine derartige Gesamtbewertung der Luftqualität durch die Berücksichtigung einzelner atmosphärischer Spurenstoffe vornehmen, der Nachteil ist jedoch, dass nur eine bestimmte Auswahl an Leitsubstanzen berücksichtigt wird.

In diesem Zusammenhang sind Luftbelastungsindizes (LBI), bei denen es sich um die Angabe des Anteils einzelner Spurenstoffe an ihren jeweiligen Grenzwerten, jedoch unabhängig von ihrer Wirkung, handelt, von Luftqualitätsindizes (LQI) zu unterscheiden, deren Wirkungsbezug auf toxikologischen und epidemiologischen Untersuchungen basiert (Mayer et al. 2002). Auf die LQI kann hier nicht näher eingegangen werden. Die planungsbezogenen Luftbelastungsindizes (LBI_1 = Jahresmittelwert; LBI_2 = Kurzzeitbelastung) können mit Hilfe von Gl. 6 und Gl. 7 berechnet werden, wobei sich die im Nenner stehenden Werte auf EU-Grenzwerte beziehen.

$$LBI_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{C_{(SO_2)}}{20 \mu\text{g m}^{-3}} + \frac{C_{(NO_2)}}{40 \mu\text{g m}^{-3}} + \frac{C_{(PM_{10})}}{40 \mu\text{g m}^{-3}} + \frac{C_{(Benzol)}}{5 \mu\text{g m}^{-3}} \right) \quad \text{Gl. 6}$$

mit C dem arithmetischen Jahresmittelwert der Konzentration des jeweiligen Spurenstoffs ($\mu\text{g m}^{-3}$),

$$LBI_2 = \frac{1}{4} \left(\frac{N_{(SO_2)}}{24} + \frac{N_{(NO_2)}}{18} + \frac{N_{(PM_{10})}}{35} + \frac{N_{(CO)}}{1} \right) \quad \text{Gl. 7}$$

mit N der tatsächlichen Anzahl jährlicher Überschreitungen des jeweiligen EU-Kurzzeitgrenzwertes.

Da es für CO keinen EU-Jahresgrenzwert gibt, wurde in Gl. 6 stattdessen Benzol aufgenommen. Ozon wurde nicht berücksichtigt, weil es sich mit raumplanerischen Mitteln zumindest nicht auf lokaler Ebene beeinflussen lässt. Anhand eines Bewertungsschemas, das sich von 'sehr geringer Luftbelastung' ($LBI_1, LBI_2 < 0,2$) bis zu 'starker Luftbelastung' ($LBI_1, LBI_2 > 0,8$) erstreckt, können für die genannten Indikatoren summarische Aussagen zur Lufthygiene gemacht werden.

4 Steuerung stadtklimatischer Prozesse

Die Verbesserung von Klima und Luft in Ballungsräumen und Städten sollte von der Vorstellung getragen sein, ein 'ideales Stadtklima' durch planerische Eingriffe für die Stadtbewohner anzustreben. Hierunter wird 'ein räumlich und zeitlich variabler Zustand der Atmosphäre in urbanen Bereichen (verstanden), bei dem sich möglichst keine anthropogenen Schadstoffe in der Luft befinden und den Stadtbewohnern im bodennahen Bereich eine möglichst große Vielfalt an urbanen Mikroklimaten unter Vermeidung von Extremen geboten wird' (Mayer 1989, S. 53). Eine derartige Forderung lässt sich in strengem Sinne nur dort realisieren, wo Neugründungen von Städten vorgesehen sind und bereits in der Planungsphase Stadtklimatologen in enger Abstimmung mit den Entscheidungsträgern zusammenarbeiten. Das dürfte in großem Stil zum Beispiel auf den asiatischen, insbesondere auf den chinesischen Raum zutreffen,

wo in den nächsten Jahrzehnten eine Vielzahl von Millionenstädten geplant ist. Realistischerweise gilt dies für bestehende Siedlungsräume nicht. Hier kann es allenfalls Aufgabe der Stadtplanung sein, diesem Ideal durch Maßnahmen zur Minimierung der Belastungen und zu stadtklimatisch wirksamen Umfeldverbesserungen möglichst nahe zu kommen, so dass zumindest ein 'tolerierbares Stadtklima' angestrebt werden kann. Die derzeit in einigen deutschen Großstädten zu beobachtende Bevölkerungsabwanderung eröffnet die Möglichkeit, bestehende Stadtstrukturen zukunftsweisend auf neue Anforderungen auszurichten und dabei stadtklimatische Erkenntnisse in den Planungsvollzug zu integrieren. Das sollte als Chance gesehen werden, freiwerdenden Wohnraum auch stadtklimatologisch sinnvoll umzuwidmen.

Von Barlag (1997) werden in diesem Zusammenhang verschiedene Handlungsfelder genannt, auf die hier Bezug genommen werden soll. Dabei sind flächenbezogene von verkehrs- und objektorientierten Maßnahmen zu unterscheiden.

Zu den flächenbezogenen Maßnahmen zählen zum Beispiel eine Auflockerung der Bebauungsstruktur, die Schaffung oder Sicherung klimarelevanter naturbelassener Freiflächen sowie die Erhaltung bzw. strukturelle Verbesserung von Luftleitbahnen, über die Umlandluft in bebauten Gebiet geführt werden kann (Dütemeyer et al. 2004). Neben Wasserflächen (Kuttler 1991) spielen in diesem Zusammenhang innerstädtische Grünflächen eine besondere Rolle (Weber et al. 2004). Bei optimaler Gestaltung verhindern oder reduzieren diese thermische Belastung, wenn ein Luftaustausch zwischen ihnen und der bebauten Fläche gewährleistet ist (Weber und Kuttler 2004). Klimameliorierende Eigenschaften mit Fernwirkung werden von Horbert (2000) allerdings nur solchen Grünflächen zuerkannt, die eine Mindestgröße von 50 ha aufweisen.

Aber auch kleinere Flächen können umweltverbessernd wirken, wenn diese über ein Verbundsystem (Luftleitbahnen) optimal miteinander vernetzt sind. Die Schaffung zusätzlicher Grünflächen sollte bei Nutzungsänderungen (Industriebrachen, Bebauungslücken, ungenutzte Bahnlinien, Verlegung von Parkraum unter die Erde etc.) ebenso ins Auge gefasst werden, wie die Möglichkeit der Begrünung von Hausfassaden und Dachflächen, die nicht nur für das Einzelobjekt, sondern auch darüber hinaus positive Wirkungen auf das Stadtklima haben (Höschele und Schmidt 1974).

Zu den verkehrsorientierten Maßnahmen zählen eine weitere Reduzierung der Kfz-Emissionen bzw. der verstärkte Einsatz emissionsarmer Fahrzeuge (Hybrid-, Elektro- und Wasserstoffantrieb), die Vermeidung unnötiger Individualfahrten, ein optimales Verkehrsmanagement, das durch entsprechende Leitsysteme einen möglichst kontinuierlichen Verkehrsfluss sichert, ein Ausbau des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) mit Erhöhung der Taktfrequenz und – bei der Anlage neuer Wohngebiete – diese so zu gestalten, dass der Gebrauch des Kfz für Versorgungsfahrten grundsätzlich minimiert werden kann.

Zu den objektorientierten Maßnahmen zählt eine Einschränkung des Energieverbrauchs für den Gebäudebetrieb (Heizen, Kühlen, Lüften, Beleuchten) durch klimagerechtes Bauen (Kuttler 1993). Hierunter ist eine optimale Standortwahl von

Neubaugebieten mit entsprechender Gebäudekonzeption, -ausrichtung, -form, -anordnung und -wärmedämmung zu verstehen. Da nach wie vor ein großer Teil der Primärenergie in den winterkalten Gebieten für die Hausbeheizung aufgewendet werden muss, ist auf energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden besonders zu achten. Dabei würde nicht nur sparsamer mit Energie umgegangen, sondern auch auf lokaler Ebene den insbesondere in Städten erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen entgegengearbeitet (Henninger und Kuttler 2004).

5 Stadtklima und globale Klimaentwicklung

Vor dem Hintergrund einer für das 21. Jahrhundert vorausgesagten Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration wird für Europa davon ausgegangen, dass es zu einer durchschnittlichen, regional jedoch durchaus unterschiedlich erfolgenden Erwärmung von etwa 2 K gegenüber dem Vergleichsjahr 1985 kommt (Houghton et al. 2001). Unter Zugrundelegung der Ergebnisse verschiedener numerischer Modellanalysen (Wagner 1994, Groß 1996) soll der globale Einfluss auf die thermischen und lufthygienischen Verhältnisse mitteleuropäischer Großstädte exemplarisch kurz dargestellt werden.

Wie sich die thermischen Bedingungen als Folge der Modellszenarien für Berlin verändern werden, zeigt **Tabelle 4** anhand der Darstellung ausgewählter klimatologischer Ereignistage. So wird zum Beispiel die Winterstrenge (Anzahl der Eis- und Frosttage) abnehmen, die Sommerwärme (heiße Tage und Sommertage) hingegen zunehmen. Daraus dürfte eine Energieeinsparung im Winter wegen reduzierter Beheizung von Gebäuden resultieren, der im Sommer hingegen ein gesteigerter Betrieb von Klimaanlage wegen des zunehmenden Bedarfs an Kühlung gegenübersteht; letzteres gilt allerdings nur, wenn die Anzahl der Gebäudeklimaanlagen erhöht wird.

Für die Stadt Essen konnte zum Beispiel anhand des Stromverbrauchs berechnet werden, dass durch den winterlichen Minderverbrauch der Jahresverbrauch um 8% zurückgehen wird. Ein Teil dieser Einsparung würde allerdings durch verstärkten Betrieb von Klimaanlage in den warmen Monaten wieder aufgezehrt, so dass die Jahresstromersparung nur noch bei 5% liegen dürfte (Kuttler 2001).

In subtropischen Ländern spielt der winterliche Energieeinsatz hingegen nur eine untergeordnete Rolle. Wichtige Steuerungsgröße im Energieverbrauch stellt hier die sommerliche Raumkühlung dar. Dieser dürfte sich nach Untersuchungen im Großraum Los Angeles im Vergleich zu 1985 um ein Drittel erhöhen (Oke 1994). Der höhere Verbrauch führt zu einer zusätzlichen städtischen Überwärmung, stärkeren Luftbelastung durch anthropogene Spurenstoffe und Verringerung der für die Energiebereitstellung notwendigen Ressourcen. Die genannten Beispiele aus den beiden Klimazonen belegen, dass der regionale Aspekt einer globalen Klimaveränderung einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch haben wird. Damit rücken Megastädte in den Vordergrund der zukünftigen Betrachtung, da es sich hierbei um die bedeutendsten regionalen Luftverunreinigungsquellen handeln wird, die zudem über eine nur schlecht kontrollierbare Emittentenstruktur verfügen.

Doch auch der bodennahe atmosphärische Austausch wird durch eine prognostizierte globale Erwärmung verändert. Für Berlin konnte Groß (1996) exemplarisch nachweisen, dass es zu einem häufigeren Auftreten hochreichender Temperaturinversionen (> 300 m) kommen wird, und zwar im Vergleich zu 1985 um mehr als 20%. Die Anzahl flacher bzw. geringmächtiger Inversionen dürfte nach den vorliegenden Modellaussagen abnehmen. Da mächtigere Inversionen im Vergleich zu flachen Inversionen eine größere Erhaltungseigenschaft aufweisen, wird sich hierdurch das Problem der Luftverunreinigung aufgrund der längeren Dauer derartiger Episoden verschärfen.

Das könnte sich besonders auf die Ozonkonzentrationen auswirken, da das Ozonbildungspotential von den Vorläuferstoffen und der Zeit sowie indirekt von der Temperatur und der Strahlungsintensität abhängt. Um sowohl der sommerlichen Überwärmung als auch dem prognostizierten Anstieg sekundärer Luftverunreinigungen entgegenzuwirken, sollte der Anteil an Grünflächen in den Städten erhöht werden, da diese durch Reduktion der Oberflächen- und Lufttemperaturen nicht nur den thermischen Komfort erhöhen, sondern auch zu Energieeinsparungen durch Beschattung und Verdunstung führen, sowie in Küstenstädten dem Windschutz dienen. Würde bei der intensiven Begrünung städtischer Areale ferner darauf geachtet, dass nur solche Pflanzen Verwen-

Tabelle 4: Klimatologische Ereignistage für den Ballungsraum Berlin unter gegenwärtigen und veränderten Klimabedingungen, nach Wagner 1994; verändert)

Klimatologische Ereignistage	Gegenwart	Modellierung nach Szenario A ('business as usual') für Ende 21. Jh.	Änderung
	Mittlere Anzahl / Jahr		
Extrem heiße Tage $t_{\text{Max}} \geq 39^\circ\text{C}$	0,01	0,04	+0,03
Heiße Tage $t_{\text{Max}} \geq 30^\circ\text{C}$	5,4	11,7	+6,3
Sommertage $t_{\text{Max}} \geq 25^\circ\text{C}$	27,2	41,8	+14,6
Frosttage $t_{\text{Min}} \leq 0^\circ\text{C}$	56,6	38,6	-18,0
Eistage $t_{\text{Max}} \leq 0^\circ\text{C}$	22,0	8,8	-13,2
Extrem kalte Tage $t_{\text{Max}} \leq -10^\circ\text{C}$	0,7	0,11	-0,59

fung fänden, die hinsichtlich der Freisetzung an BVOC (Isopren, Monoterpene) zur Gruppe der so genannten emissionsarmen Spezies zählen (Freisetzung von $< 2 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ($\text{g} = \text{Gramm Blatttrockenmasse}$) an Isopren sowie $< 1 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ an Monoterpenen; Taha 1996), dann würde einer pflanzenbedingten Produktion an Ozonvorläufergasen dadurch kein Vorschub geleistet. Letztendlich wird eine verstärkte pflanzliche Photosynthese auch zu einer erhöhten Aufnahme an CO_2 führen, was die Reduktion dieses infrarotaktiven Gases in der Atmosphäre nach sich zieht und damit einer globalen Klimaänderung entgegenarbeitet.

6 Ausblick

Die Stadtklimatologie hat sich insbesondere in Deutschland während der vergangenen Jahrzehnte als eine wichtige Teildisziplin der Umweltmeteorologie etabliert. Neben der Weiterentwicklung der Grundlagenforschung beruht die zunehmende Bedeutung dieses Fachgebietes in erster Linie auf seinem Anwendungsbezug, der beinahe sämtliche Ebenen der räumlichen Planung umfasst. Messungen und Modellrechnungen fallen dabei eine besonders große Rolle zu. Zukünftig werden umfangreiche Aufgaben von der Stadtklimatologie zu bewältigen sein: Nicht nur in den westlichen Industrieländern, wo es aufgrund der Bevölkerungsdynamik zu einem Umbau der Ballungszentren kommen wird, sondern auch in den Megastädten der Schwellen- und Entwicklungsländer, deren umweltmeteorologische Probleme im Bereich Klima und Luft zum Wohle ihrer Bewohner gelöst werden müssen.

Literatur

22. BImSchV (2002): Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe der Luft vom 11.09.2002 (BGBl. 1 2002, S. 3626)
- Arnfield J (2003): Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island. *Int J Climatol* 23, 1–26
- Barlag AB (1997): Möglichkeiten der Einflußnahme auf das Stadtklima. *VDI-Berichte* 1330, 127–146
- Barlag AB, Kuttler W (1990/91): The Significance of Country Breezes for Urban Planning. *Energy and Buildings* 15 (3–4) 291–297
- Blankenstein S, Kuttler W (2004): Impact of street geometry on downward longwave radiation and air temperature in an urban environment. *Meteorol Z* (im Druck)
- Braham RR, Semonin RG, Auer AH, Changnon SA (1981): Summary of the urban effects on cloud and rain. *B Am Meteorol Soc* 40, 142–152
- Dütemeyer D, Barlag AB, Kuttler W (2004): Planungsrelevante Stadtklimatologie am Beispiel der beabsichtigten Flächenumwidmung einer Industriebrache. *UVP-Report* 1/2004, 21–26
- Groß G (1996): Stadtklima und Globale Erwärmung. *Geowissenschaften* 14, 245–248
- Harlfinger O, Kobinger W, Fischer G, Pilger H (2000): Industrieschneefälle – ein anthropogenes Phänomen. *Meteorol Z* 9, 231–236
- Helbig A (1987): Beiträge zur Meteorologie der Stadtatmosphäre. *Abh Meteorol Dienst DDR* 137
- Helbig A, Baumüller J, Kerschgens MJ (Hrsg) (1999): *Stadtklima und Luftreinhaltung*, 2. Auflage. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 467 S.
- Henninger S, Kuttler W (2004): Mobile Measurements of Carbon Dioxide in the Urban Canopy Layer of Essen, Germany. *Proc. Fifth Symp Urban Environm* 23–26 Aug 2004, Vancouver, Canada, J12.3
- Höppe P (1984): Die Energiebilanz des Menschen. *Münchener Univ Schriften, Meteorol Inst, Wiss Mitt* 49
- Höppe P, Mayer H (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19, 22–29
- Höschele K, Schmidt H (1974): Klimatische Wirkungen einer Dachbegrünung. *Garten und Landschaft* 6/74, 334–337
- Horbert M (2000): Klimatologische Aspekte der Stadt- und Landschaftsplanung. *Schriftenr Fachber Umwelt u Gesellsch* 113, 330 S.
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA (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
- Hupfer P, Kuttler W (Hrsg) (1998): *Witterung und Klima*, 10. Auflage. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 413 S.
- Jendritzky G, Menz G, Schirmer H, Schmidt-Kessen W (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (fortgeschriebenes Klimamichel-Modell). *Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung* 114, Hannover
- Jendritzky G, Koppe C, Laschewski G (2004): Klimawandel – Auswirkungen auf die Gesundheit. *Pädiatrische Praxis* 64, 355–368
- Kan HD, Jia J, Chen BH (2003): Temperature and Daily Mortality in Shanghai: A Time-series Study. *Biomed Environ Sci* 16, 133–139
- Kuttler W (1991): Zum klimatischen Potential urbaner Gewässer. In: Schuhmacher H, Thiesmeier B (Hrsg): *Urbane Gewässer. Reihe Ökologie* 4. Westarp Wissenschaften, Essen 378–394
- Kuttler W (1993): Klimagerechtes Bauen. In: Schirmer H, Kuttler W, Löbel J, Weber K (Hrsg): *Lufthygiene und Klima. Ein Handbuch zur Stadt- und Regionalplanung*. VDI Verlag, Düsseldorf, 352–364
- Kuttler W (1997): Städtische Klimamodifikation. In: *VDI-Berichte* 1330. VDI Verlag Düsseldorf, 87–108
- Kuttler W (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. *Wiss Mitt Inst Met Leipzig* 13, 100–115
- Kuttler W (2000): Stadtklima. In: Guderian R (Hrsg): *Atmosphäre, Band 1 B. Handb Umweltveränd Ökotox*, Berlin, Heidelberg, Springer, 420–470
- Kuttler W (2001): Urban Climate and Global Change. In: Lozán J L, Graßl H, Hupfer P (Hrsg): *Climate of the 21st century: Changes and Risks*. Hamburg, Wissenschaftliche Auswertungen, 344–349
- Kuttler W (2004): Stadtklima, Teil 1: Grundzüge und Ursachen. *UWSF – Z Umweltchem Ökotox* 16 (3) 187–199 <DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2004.03.078>>
- Kuttler W, Zmarsly E (1995): Sommersmog: Zur Problematik aus naturwissenschaftlicher Sicht. *Z Angew Umweltfor* 8 (2) 153–159
- Kuttler W, Schaefer S (2000): On the Detection of Intra-Urban Global Radiation Differences by Mobile Measurements. *Third Symposium on the Urban Environment*, 18–20 August 2000, Davis, AMS, 147–148

- Landesumweltamt NRW: Homepage des nordrheinwestfälischen Landesumweltamtes mit der Adresse <<http://www.lua.nrw.de>>
- Landsberg HE (1981): *The Urban Climate*. International Geophysics Series 28, Academic Press New York, 275 S.
- Lowry WP (1998): Urban effects on precipitation amount. *Prog Phys Geog* 22 (4) 477–520
- Matzarakis A (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas. *Ber Meteor Inst Univ Freib* 6, 275
- Mayer H (1989): Workshop 'Ideales Stadtklima' am 26. Okt. 1988 in München. *Mitt Deutsche Meteorol Ges* 3/89, 52–54
- Mayer H (1990): Human-biometeorologische Bewertung des Stadtklimas. *Umweltmeteorologie, Schriftenreihe VDI DIN*, Bd. 15, 87–104
- Mayer H, Noack EM (1980): Einfluss der Schneedecke auf die Strahlungsbilanz im Großraum München. *Meteorol Rdsch* 33, 65–74
- Mayer H, Beckröge W, Matzarakis A (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. *UVP-Report* 5/94, 265–268
- Mayer H, Kalberlah F, Ahrens D, Reuter U (2002): Analyse von Indizes zur Bewertung der Luft. *Gefahrstoffe-Reinhalung der Luft* 62 (4) 177–183
- Mayer H, Matzarakis A, Iziomon MG (2003): Spatio-temporal variability of moisture conditions within the Urban Canopy Layer. *Theor Appl Climatol* 76, 165–179
- Möller D (2003): *Luft. Chemie, Physik, Biologie, Reinhaltung, Recht*. deGruyter, Berlin, 750 S.
- Oke TR (1994): Global Change and Urban Climates. *Proceedings 13th International Congress on Biometeorology*, 12–13.09.1993, Calgary, Canada, 123–134
- Oke TR (1997): Surface climate processes. In: Bailey WG (ed): *The surface climates of Canada*. McGill-Queen's University Press, Montreal & Kingston, London, Buffalo, S. 21–43
- Parlow E (2003): The urban heat budget derived from satellite data. *Geographica Helvetica* 58 (2) 99–111
- Reitebuch O, Straßburger A, Emeis S, Kuttler W (2000): Nocturnal secondary ozone concentration maxima analysed by sodar observations and surface measurements. *Atmos Environ* 34 (25) 4315–4329
- Rosenfeld D (2000): Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution. *Science* 287, 1793–1796
- Rotach MW (1999): On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. *Atmos Environ* 33, 4001–4006
- Schütz M (1995): Anthropogene Niederschlagsmodifikationen im komplex-urbanen Raum am Beispiel des Ruhrgebiets. *Dissertation, Fb 9, Universität Essen*, 151 S.
- Schütz M (1996): Anthropogene Niederschlagsmodifikationen im komplex-urbanen Raum. *Geowissenschaften* 14, 249–252
- Shepherd JM, Pierce H, Negri AJ (2002): Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborn rain radar on the TRMM satellite. *J Appl Meteorol* 41 (7) 689–701
- SSK (=Strahlenschutzkommission) (1995): Einführung eines internationalen solaren UV-Index. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission vom 8. Dez. 1995 sowie Fassung von 1993
- Staiger H, Schubert U, Vogel G (1997): Solarer UV-Index. Definition, Einflussgrößen, Verteilung, Vorhersage im DWD und strahlenhygienische Ziele. *Ann Meteorol* 33, 126–132
- Straßburger A (2004): Analyse atmosphärischer Spurengase zur Bestimmung des Erholungswertes eines urbanen Parks. *Dissertation FB 9, Univ Duisburg-Essen, Campus Essen*, 167 S.
- Taha H (1996): Modelling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmos Environ* 30 (20) 3423–3430
- Tapper NJ (1990): Urban influences on boundary layer temperature and humidity: results from Christchurch, New Zealand. *Atmos Environ* 24B (1) 19–27
- VDI (1998): *Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima = VDI-Richtlinie 3787, Bl 2*, Düsseldorf, 29 S.
- Wagner D (1994): Wirkung regionaler Klimaänderungen in urbanen Ballungsräumen. *Meteorol Inst Humboldt-Univ Berlin* 7, 1–14
- Weber K, Ropertz A, Kuttler W (2004): Erfassung und Analyse atmosphärischer Spurenstoffe im Bereich einer urbanen Grünfläche unter Verwendung optischer Fernmessverfahren. *Gefahrstoffe-Reinhalung der Luft* 64 (9) 271–279
- Weber S (2004): Energiebilanz und Kaltluftdynamik einer urbanen Luftleitbahn, *Dissertation FB 9, Universität Duisburg-Essen, Campus Essen*, 207 S.
- Weber S, Kuttler W (2003): Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und -qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn. *Gefahrstoffe-Reinhalung der Luft* 63 (9) 381–386
- Weber S, Kuttler W (2004): Cold Air ventilation and the nocturnal Boundary Layer Structure above an urban ballast facet. *Meteorol Z* (im Druck)
- Wildt J, Rockel P, Lausch E (2001): Die Stresssignale der Pflanzen. *Spektrum Wiss* 08/2001, 50–55
- Zmarsly E, Kuttler W, Pethe H (2002): *Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen*, 2. Auflage. Eugen Ulmer, Stuttgart, 176 S.

Eingegangen: 29. Juni 2004
 Akzeptiert: 03. August 2004
 OnlineFirst: 04. August 2004

Univ.-Prof. Dr. Wilhelm Kuttler ist Leiter der Abteilung Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie 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 lufthygienischen Einfluss urbaner Grünflächen auf die bebauten Umgebung sowie zum Kaltlufttransport zwischen Stadt und Umland.