

Urbanes Klima

Teil 2

W. Kuttler

Zusammenfassung Stadtgebiete spielen im Zusammenhang mit der Diskussion über den globalen Klimawandel eine herausragende Rolle, weil sie wegen der hohen Einwohnerdichten besonders verletzlich sind. Um Minderungsmaßnahmen gegen die Auswirkungen des Klimawandels im urbanen Maßstabbereich vornehmen zu können, ist eine genaue Kenntnis des stadtklimatologischen Wirkgefüges notwendig. Der Beitrag beschäftigt sich in Teil 1 mit den wichtigsten Spezifika des Stadtklimas im Vergleich zum Freilandklima. Ausgehend von der Analyse der Struktur der urbanen bodennahen Grenzschicht, der veränderten Strahlungs- und Wärmebilanzen sowie des städtischen Wärmeinseleffekts und der Luftqualität wird ferner der Einfluss von Stadtgebieten auf Luftfeuchtigkeit, Niederschläge und Nebel behandelt. Teil 2 behandelt stadtklimatische Bewertungs- und Darstellungsverfahren, geht exemplarisch auf Maßnahmen zur Verbesserung des Stadtklimas ein, gibt einen Ausblick auf diejenigen Veränderungen in Stadtgebieten, die nach den Modellberechnungen durch den globalen Klimawandel verursacht werden, und schließt mit Vorschlägen zu Minderungsmaßnahmen auf Objekt- und Quartierebene.

Urban climate

Abstract Urban areas play an outstanding role regarding to the impact assessment of Global Climate Change at the local and regional scale. Due to the high population density towns and cities exhibit an increased vulnerability towards shifting climatic conditions. To perform counteractive measures against the changing climate impacts in urban areas, detailed knowledge about urban climatic phenomena and causalities is essential. Therefore characteristic differences between urban and rural climates are outlined within the frames of the given paper. On part 1 an analysis of the urban atmospheric boundary layer structure, modifications of the urban radiation and energy balance are discussed. In addition to the characteristics of the urban heat island effect and urban air quality, the impact of built-up areas on atmospheric humidity, precipitation and fog are reviewed. In part 2 methods for illustration and evaluation of urban climatic effects, as well as tasks for meliorating the urban climate are considered. The article ends with a prospect on future changes in urban climate modifications caused by global climatic changes which are predicted by model simulations. Recommendations for mitigation of these impacts on the neighborhood are given.

4 Stadtklimatische Bewertungs- und Darstellungsverfahren

Um die Ergebnisse stadtklimatischer Messungen in ihrer Bedeutung für die Stadtbewohner angemessen und möglichst objektiv einschätzen zu können, müssen diese Daten bewertet werden. Dies geschieht für die humanbiometeorologischen Wirkungskomplexe durch die Verwendung entsprechender Indizes. So z. B. für

Prof. Dr. Wilhelm Kuttler,

Abteilung Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie,
Universität Duisburg-Essen, Essen.

- den fotoaktinischen Wirkungskomplex durch den UV-Index [56],
- den thermischen Wirkungskomplex durch Angaben des *PMV* (Predicted Mean Vote; [57]), der *PET* (Physiologically Equivalent Temperature; [58]), der *pt* (perceived temperature) oder des *UTCI* (Universal Thermal Climate Index; [59]) sowie
- den lufthygienischen Wirkungskomplex durch die Kurzzeit- und Langzeitindizes für Luftqualität *DAQx* (Daily Air Quality Index) respektive *LAQx* (Longtime Air Quality Index) [60].

Anwendungsbezogene Hinweise zur Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene, deren Bewertung für stadtplanerische Belange sowie die Darstellung stadtklimatischer Sachverhalte herangezogen werden können, sind in verschiedenen VDI-Richtlinien zur Umweltmeteorologie enthalten [8; 9 (siehe Teil 1¹⁾]; 61 bis 63].

Bei der Verwendung von Mess- und Bewertungsdaten für die Praxis [63] hat sich das Konzept der „Synthetischen Klimafunktionskarte“ [8, siehe Teil 1] bewährt. Hierbei handelt es sich um kartografisch aufbereitete flächenbezogene und bewertende Darstellungen klimatischer und lufthygienischer Sachverhalte, die vielfach die Basis für Planungshinweiskarten bilden, in denen Maßnahmenempfehlungen für den Anwender enthalten sind [64; 65]. Dem Beispiel Deutschlands, wo insbesondere für Stuttgart ein erster Klimaatlas für die Stadtplanung entstand [66], folgten verschiedene Städte in Asien, so in Hongkong [67] und Japan [68] mit der Anfertigung vergleichbarer Werke.

5 Maßnahmen zur Verbesserung des Stadtklimas

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 städtischen Bereichen (verstanden), bei dem sich möglichst keine anthropogenen Schadstoffe in der Luft befinden und den Stadtbewohnern im bodennahen Bereich eine möglichst große Vielfalt an städtischen Mikroklimaten unter Vermeidung von Extremen geboten wird“* [69]. 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 z. B. auf den asiatischen, insbesondere chinesischen Raum zutreffen, wo 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, sodass zumindest ein

¹⁾ Teil 1 dieses Beitrags ist in Heft 7/8 (2010), S. 329-340, erschienen.

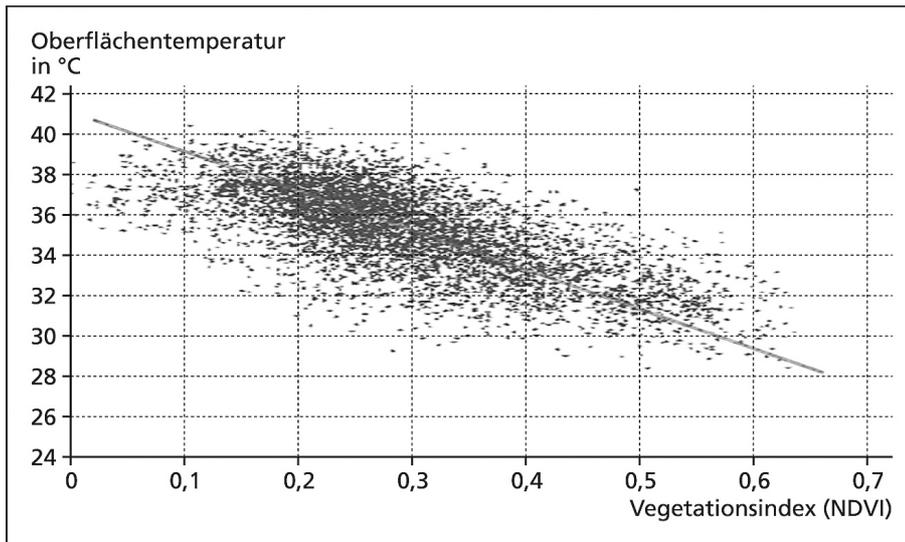


Bild 16. Abhängigkeit der Oberflächentemperaturen vom Pflanzenbedeckungsgrad (NDVI) in Paris am Nachmittag (1. bis 13. August 2003; 12 bis 14 UTC), nach [43, siehe Teil 1], verändert. Die Auswertung beruht auf 61 Satellitenaufnahmen. Der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) erlaubt Aussagen zur Dichte von Vegetationsflächen; nackter Boden hat einen Wert von Null, pflanzenbestandene Flächen erreichen bis zu 0,7; weitere Erläuterungen in [75].

tolerierbares Stadtklima angestrebt werden kann. Die derzeit nicht nur in einigen deutschen Großstädten zu beobachtende Bevölkerungsabwanderung („Schrumpfende Städte“, engl. *shrinking cities*) eröffnet die Möglichkeit, bestehende Stadtstrukturen zukunftsweisend auf neue Anforderungen auszurichten und dabei stadtklimatische Erkenntnisse in den Planungsbezug zu integrieren. Dabei sollte es als Chance gesehen werden, freiwerdende Räume so umzuwidmen, dass verstärkt Wasser- oder Grünflächen zur Verbesserung der stadtklimatischen und lufthygienischen Situation angelegt werden.

5.1 Wasserflächen

Im Falle von stehenden oder fließenden Gewässern ist grundsätzlich das bekannte paradox erscheinende klimatologische Phänomen zu beobachten, dass trotz hoher solarer Strahlungsaufnahme (überwiegend geringe Albedowerte) eine Erwärmung eines Wasserkörpers kaum oder nur in geringem Maße auftritt. Das liegt u. a. an der relativ hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser ($c_{\text{H}_2\text{O}} = 4,2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), die eine schnelle Temperaturveränderung verhindert. Ein weiterer, für die bebauten Umgebung wichtiger Kühleffekt wird durch die Wasserverdunstung sichergestellt. Diese kann in Deutschland an sonnenscheinreichen Tagen hohe Werte über einer Gewässeroberfläche erreichen ($\leq 4 \text{ mm/d}$; [70]). Denn dadurch werden etwa $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in latente Wärme überführt, die dann nicht dem sensiblen Wärmestrom für die Lufterwärmung zur Verfügung stehen ($Bo \ll 1$). Noch höhere Verdunstungsraten wurden für Ufer begleitende Schilf- und Röhrichtbestände nachgewiesen, die bis zu dem 1,5-Fachen der Jahresniederschläge evapotranspirieren können und dabei Tagesleistungen von mehr als 12 mm sowie Jahressummen von bis zu 1 600 mm erreichten [71]. Aber auch Fließgewässer, wie nicht eingedämmte Flüsse, können neben stehenden Gewässern zu Temperatursenkungen im nahen bebauten Bereich führen, wenn der Flusslauf einige hundert Meter breit ist, die möglichst senkrecht zum Verlauf des Flusses abführenden Straßen nicht durch hohes Verkehrsaufkommen verstopft sind und sich ein

Flusswind entwickeln kann, der die kühle Luft in die Bebauung trägt [72].

Küstenstädte können in besonderem Maße in Ufernähe während des Sommers von der kühlenden Wirkung des Seewinds profitieren. Untersuchungen in der Bucht von Tokio zeigten z. B. eine signifikante Lufttemperaturabsenkung landeinwärts bis in eine Entfernung von etwa 10 km zur Küste [73].

5.2 Grünflächen

Die positive Wirkung von Grünflächen auf Klima, Luftqualität und Lärminderung in Städten wird durch die Größe, den Aufbau und die Zusammensetzung der vegetationsbestandenen Flächen bestimmt. Lassen schon mit Gras bepflanzte Flächen günstige Veränderungen in ihrer Strahlungs- und Wärmebilanz gegenüber der bebauten Umgebung

erkennen, allerdings nur, wenn sie gut mit Wasser versorgt sind, so verstärken sich die bioklimatischen Effekte durch das Vorhandensein von Sträuchern und schattenspendenden hohen Bäumen. Diese bewirken eine Zunahme der Verschattung und des latenten Wärmestroms auf Kosten des sensiblen Wärmestroms. Da Q_E durchaus größer sein kann als Q^* , spricht man auch vom „Oaseneffekt“ einer Grünfläche. Hierdurch und aufgrund des Schattenwurfs des Vegetationsbestands stellt sich eine niedrigere Oberflächen- und Lufttemperatur gegenüber der Umgebung ein. Diese horizontale Temperaturdifferenz zwischen einer Grünfläche und ihrer bebauten Umgebung wird auch Parkkälteinsel (engl. *Park Cool Island, PCI*; [74]) genannt, deren Abkühlungsbetrag mit der Größe der Grünfläche zunimmt und nachts stärker ausgeprägt ist als tagsüber.

Da der größte Teil der Strahlung bereits vom Kronendach und im Stammraum absorbiert wird, steht weniger Energie für die Bodenerwärmung und Speicherung zur Verfügung als es bei versiegelten Flächen der Fall ist.

In welchem Maße mit Vegetation bestandene Flächen die Oberflächentemperaturen reduzieren, zeigt Bild 16. Je stärker eine Fläche begrünt ist, desto niedriger sind im Allgemeinen die Oberflächentemperaturen. Im vorliegenden Beispiel wurde der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) aus Satellitendaten verwendet, um die Abhängigkeit der Temperatur von der Vegetationsbestandsdichte zu dokumentieren. Hiernach nimmt die Temperatur um 2 K pro 0,1 Einheit Zunahme des Indexes ab.

Ferner bewirkt das z. B. durch Bäume vergrößerte Bestandsvolumen aufgrund der Reduzierung der Windgeschwindigkeit eine effektive Filterung der durch den Stammraum strömenden Luft. So können z. B. Nadelbäume um das bis zu 2,5-Fache an Spurenstoffen (Sulfat, SO_4) durch nasse und trockene Deposition im Vergleich zum Freiland ausfiltern [76]. Für die Staubfilterung spielen dabei Art und Dichte der Vegetation eine maßgebliche Rolle [77]. Schon 200 m entfernt von einer stark befahrenen Straße konnten innerhalb einer Grünfläche im Jahresmittel Minderungswerte zwischen 40 und 50 % für NO und NO_2 bzw. um 20 % niedrige-

Tabelle 2. Übersicht über Größe, Umgebung, maximale Kühleffekte (*PCI*) und thermische Reichweiten städtischer Grünflächen, nach einer Zusammenstellung in [73]; gekürzt und verändert; Literatur siehe dort, UHI = Wärmeinseleffekt.

Größe in ha (gerundet)	Lage (UHI in K)	Park	Gestaltung	PCImax in K	Reichweite in m	Quelle
3	Kumamoto (Kyushu) [3 tags, 2 nachts]	Kengung Shinto Shrine	Bäume	2,5 (15 Uhr)	50	Saito u. a. 1990
5	Vancouver (6 bei Sonnenuntergang)	Trafalgarpark	Gras, Baumrand teilweise bewässert	5,0 (nachts) Messfahrt	200 bis 300	Spronken-Smith und Oke 1998
18	Berlin	Stadtpark Steglitz	–	1,0 (abends)	80 bis 140	von Stülpnagel 1987
30	Mainz	Stadtpark	–	2,0 (morgens)	< 300	Naumann 1981
44	Stuttgart	Schlossgarten	–	1,3 (Jahresmittel) 3,8 (Tagesmittel)	200	Knapp 1998
80	Kopenhagen	Falledparken	Gras und Bäume	2,1 (22 Uhr)	100	Eliasson und Upmann 2000
125	Berlin	Kleingärten Priesterweg	Garten	5,4 (abends)	250	von Stülpnagel 1987
156	Göteborg	Slottsskogen	–	3,3 (18 Uhr) Station	250	Eliasson und Upmann 2000
212	Berlin	Tiergarten	Wald/Gras	4,3 (abends)	200 bis 1 300	von Stülpnagel 1987
525	Mexico City	Chapultepec	Mix (Bäume, Gras); nicht bewässert	4,0 (Trockenzeit) 1,0 (Regenzeit)	2 000 (eine Parkbreite)	Jauregui 1990

re Immissionskonzentrationen für CO im Vergleich zu den Ausgangskonzentrationen am Straßenrand ermittelt werden, während allerdings die Ozonkonzentrationen in der Grünfläche um bis zu 20 % höher waren als am Straßenstandort [78].

Auch zeichnen sich Grünflächen durch eine höhere relative Luftfeuchtigkeit gegenüber versiegelten Flächen aus.

Da Grünflächen aus den o. g. Gründen insbesondere bei Strahlungswetterlagen im Allgemeinen niedrigere Lufttemperaturen aufweisen als ihre bebauten Umgebung, können lokale Ausgleichszirkulationen zwischen diesen und dem bebauten Gebiet entstehen, die Parkwind (engl. Parkbreeze) genannt werden und Geschwindigkeiten von bis zu 1 m s^{-1} erreichen können [74]. Die Eindringtiefe der Kaltluft wird allerdings sowohl von der Gestaltung und Einfassung einer Grünfläche als auch von der Art der sie umgebenden Bebauung bestimmt. Liegt eine Grünfläche z. B. in einer Mulde oder wird sie von einer hohen Mauer umgeben, so wird der Luftaustausch hierdurch behindert und die Eindringtiefe in das bebauten Areal verkürzt. Maueröffnungen mit senkrecht dazu verlaufenden Straßen können jedoch Schneisenfunktionen übernehmen und die kühle Luft ableiten.

Aufseiten der Bebauung bestimmen deren Höhe und Dichte die Eindringtiefe der aus den Grünflächen stammenden Luft. Geschlossene hohe Häuserfronten behindern den klimatisch günstigen Einfluss, aufgelockerte Bauweise hingegen fördert ihn. Von stadtklimatisch-planerischer Relevanz ist die Beantwortung der Frage, wie groß eine Grünfläche sein muss, um zu einer Temperaturreduktion zu führen und bis zu welcher Entfernung von der Grünfläche in das bebauten Gebiet sich ein temperatursenkender Einfluss nachweisen lässt (Tabelle 2). Die thermische Reichweite hängt dabei auch von der jeweiligen Windrichtung ab. Grundsätz-

lich lässt sich feststellen, dass mit der Größe einer Grünfläche auch eine stärkere thermische Reichweite in Verbindung steht.

6 Stadtklima und globaler Klimawandel

Die Auswirkungen des für Mitteleuropa prognostizierten Klimawandels zeigen sich nicht nur in einer Veränderung der thermischen, pluviellen, hygrischen und lufthygienischen Verhältnisse, sondern beeinflussen auch das Spektrum der Großwetterlagen [79]. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass es zu einem häufigeren Auftreten austauscharmer Wetterlagen mit mächtigeren Inversionen als bisher kommen wird [80]. Hieraus dürfte für die Städte nicht nur eine Zunahme von UHI-Ereignissen resultieren, sondern bei sonnenscheinreicher warmer Witterung auch ein Anstieg der Ozonkonzentrationen in der Außenluft erfolgen [81], der allerdings im Umland stärker in Erscheinung treten wird als in Stadtgebieten.

Ein prognostizierter Temperaturanstieg dürfte ferner zu einer deutlich höheren Wärmebelastung der Stadtbewohner führen. Denn die Anzahl der Sommertage ($t_{\text{max}} \geq 25 \text{ °C}$) wird sich erhöhen, im Ruhrgebiet z. B. von derzeit 26 auf 44 d. Größere Wärmebelastung führt bekanntlich nicht nur zu einem Anstieg der Morbiditäts-, sondern auch der Mortalitätsraten [82], was sich insbesondere im Sommer 2003 durch erhöhte Sterberaten in Europa zeigte. Ein vermehrter Einsatz von Klimaanlage zur Gebäudekühlung reduziert zwar die Innenraumüberwärmung, führt jedoch zu einem erheblichen Anstieg des Energieverbrauchs [83] mit entsprechender Freisetzung von CO_2 [84] und darüber hinaus zu einer Erhöhung der Außenlufttemperaturen, wodurch der Wärmeinseleffekt (UHI) verstärkt werden kann.

6.1 Urbane Maßnahmen gegen den globalen Klimawandel

Da Städte wesentliche Netto-CO₂-Quellen sind, sollten in erster Linie hier Maßnahmen ansetzen, die dem globalen Klimawandel auf lokaler Ebene begegnen. Neben dem Einsparen von Energie und der damit einhergehenden Vermeidung von CO₂-Emissionen als unmittelbar bestehende Möglichkeit, sind mittel- und langfristige Gegenmaßnahmen auf Stadtquartiers- und Objektebene einzuleiten.

Klimagerecht geplante urbane Räume der Zukunft sollten deshalb

- eine kompakte, dennoch aber belüftungswirksame Bebauungsstruktur aufweisen,
- helle Straßen-, Gebäude- und Dachflächen zur Erhöhung der Oberflächenalbedo besitzen,
- über eine gute Wärmedämmung der Gebäude sowie über ausreichende reversible Verschattungsmöglichkeiten verfügen,
- aus Gebäuden nach dem Standard „Passivhaus“ bzw. „Plus-Energie-Haus“ bestehen,
- durch optimale Anbindung an den Personennahverkehr den Gebrauch privater Kraftfahrzeuge weitgehend überflüssig machen,
- keine ausufernde randstädtische Bebauung zulassen (engl. urban sprawl), wodurch Kaltluftentstehungsgebiete im Umland gesichert werden,
- durch Schrumpfungprozesse freiwerdende Flächen zur

- Entsiegelung und großzügigen Neubepflanzung nutzen [85],
- die „blau/grüne“ Infrastruktur verbessern, indem in Straßenbegleitgrün, Fassaden- und Dachbegrünung sowie in die Schaffung von Wasserflächen und Rigolen investiert wird,
- über eine Vegetation verfügen, die möglichst immergrün ist sowie ein hohes Staubsammelpotenzial [77] bei gleichzeitig geringer Emission biogener Kohlenwasserstoffe aufweist („Low-Emitter-Pflanzen“ [86; 87])
- eine Reduktion der NO₂-Immissionsbelastung, insbesondere jedoch der VOC sowie
- eine sinnvolle Nutzung regenerativer Energien zur Substitution des Verbrauchs fossiler Energien anstreben [88].

7 Ausblick

Die Stadtklimatologie wird bei der Lösung klimatischer und lufthygienischer Probleme, die durch den globalen Klimawandel hervorgerufen werden, eine immer größere Rolle spielen. Dabei gilt es, entsprechende Belastungsräume zu lokalisieren und geeignete Gegenmaßnahmen zu einer Verbesserung der Situation für unterschiedliche Klimaszenarien vorzuschlagen. Derzeit werden dazu in verstärktem Maße Handlungsleitfäden zur Verbesserung des Klimas in urbanen Siedlungsräumen erstellt, um dem Klimawandel auf möglichst allen Planungsebenen begegnen zu können.

Literatur

- [56] Staiger, H.; Schubert, U.; Vogel, G.: Solarer UV-Index. Ann. Meteorol. 33 (1997), S. 126-132.
- [57] Jendritzky, G.; Menz, G.; Schirmer, H.; Schmidt-Kessen, W.: Methodik der räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Beitr. Akad. f. Raumforsch. u. Landespl. 114 (1990), S. 7-69.
- [58] Mayer, H.: Indizes zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen und lufthygienischen Komponente des Klimas. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 66 (2006) Nr. 4, S. 165-174.
- [59] Jendritzky, G.: Folgen des Klimawandels für die Gesundheit. In: Endlicher, W.; Gerstengarbe, F. W. (Hrsg.): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke, S. 108-118. Potsdam: PIK 2007.
- [60] Mayer, H.; Holst, J.; Schindler, D.; Ahrens, D.: Evolution of the air pollution in SW Germany evaluated by the long-term air quality index LAQx. Atmos. Environm. 42 (2008) Nr. 20, S. 5071-5078.
- [61] VDI 3787 Blatt 2: Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung – Teil I: Klima. Berlin: Beuth 1998.
- [62] VDI 3787 Blatt 5: Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft. Berlin: Beuth 1998.
- [63] VDI 3785 Blatt 1: Umweltmeteorologie – Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima. Berlin: Beuth 2008.
- [64] Barlag, A. B.; Kuttler, W.: Prima Klima? Stadtklimatologie im Ruhrgebiet. In: Prosek, A.; Schneider, H.; Wessel, H. A.; Wetterau, B.; Wiktorin, D. (Hrsg.): Atlas der Metropole Ruhr, S. 194-195. Köln: Emons 2009.
- [65] Katzschner, L.: Beitrag der Stadtklimatologie zu den Zielen einer neuen Urbanität. UVP-Report 18 (2004) Nr. 1, S. 17-20.
- [66] Baumüller, J.; Esswein, H.; Hoffmann, U.; Reuter, U.; Weidenbacher, S.; Nagel, T.; Flassak, T.: Climate atlas of a metropolitan region in Germany based on GIS. 7th Int. Conf. Urban Clim., 29 June-3 July 2009, Yokohama, Japan.
- [67] Ren, C.; Ng, E.; Katzschner, L.: Review of worldwide urban climatic map study and its application in planning. 7th Int. Conf. Urban Clim., 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan.
- [68] Tanaka, T.; Ogasawara, T.; Koshi, M.; Yoshida, S.; Sadohara, S.; Moriyama, M.: Urban environmental climate maps for supporting urban-planning related work of local governments in Japan: case studies of Yokohama and Sakai. 7th Int. Conf. Urban Clim., 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan.
- [69] Mayer, H.: Workshop „Ideales Stadtklima“. 26. Oktober 1988, München. Mitt. Dt. Meteorol. Ges. 3/89, S. 52-54.
- [70] Werner, J.: Ein neues schwimmendes Meßsystem zur automatischen Verdunstungsbestimmung an stehenden Gewässern. Meteorol. Rundsch. 40 (1987), S. 12-19.
- [71] Larcher, W.: Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. Stuttgart: Eugen Ulmer 2001.
- [72] Umemiya, N.; Kawamoto, M.; Okura, R.; Tanaka, T.: Cooling effects of waterways on thermal comfort in urban districts during summer. Proc. 10th Int. Build. Perform. Sim. Assoc. Conf., Beijing, 3.-6. September 2007, S. 1123-1130.
- [73] Oda, R.; Kanda, M.: Cooling effect of sea surface temperature of Tokyo Bay on urban air temperature. 7th Int. Conf. Urban Clim., 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan.
- [74] Bongardt, B.: Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen – dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. Essener Ökol. Schr. Bd. 24. Hohenwarsleben: Westarp-Wissenschaften 2006.

- [75] *Hupfer, P.; Kuttler, W.* (Hrsg.): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 12. überarb. Aufl. Stuttgart: Teubner 2006.
- [76] *Wrzesinsky, T.*: Direkte Messung und Bewertung des nebelgebundenen Eintrags von Wasser und Spurenstoffen in ein montanes Waldökosystem. Dissertation Universität Bayreuth 2006.
- [77] *Litschke, T.; Kuttler, W.*: On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review. *Meteorol. Z.* 17 (2008) Nr. 3, S. 229-240.
- [78] *Ropertz, A.*: Transport atmosphärischer Spurenstoffe in eine innerstädtische Grünfläche – Eine Analyse mittels optischer Fernmessverfahren. *Essener Ökol. Schr. Bd. 26. Hohenwarleben: Westarp-Wissenschaften 2008.*
- [79] *Climate Change 2007 – The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.* Hrsg.: *Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; Miller, H. L.* Cambridge: University Press 2007.
- [80] *Jacob, D. J.; Winner, D. A.*: Effect of climate change on air quality. *Atmos. Environm.* 43 (2009), S. 51-63.
- [81] *Lin, C. Y. C.; Jacob, D. J.; Fiore, A. M.*: Trends in exceedances of the ozone air quality standard in the continental United States, 1980–1998. *Atmos. Environm.* 35 (2001), S. 3217-3228.
- [82] *Souch, C.; Grimmond, C. S. B.*: Applied climatology: heat waves. *Phys. Geogr.* 28 (2004), S. 599-606.
- [83] *Kuttler, W.*: Zum Klima im urbanen Raum. In: *Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Klimastatusbericht 2008*, S. 6-12. Offenbach/Main 2009.
- [84] *Genchu, Y.; Kikegawa, Y.; Kondo, H.; Yoshikado, H.*: Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. *Appl. Energy* 76 (2003), S. 449-466.
- [85] *Oswalt, P.; Rieniets, T.*: Atlas of shrinking cities. Ostfildern: Hatje Cantz 2006.
- [86] *Benjamin, M. T.; Winert, A. M.*: Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs. *Atmos. Environm.* 32 (1998), S. 53-68.
- [87] *Narumi, D.; Kondo, A.; Shimoda, Y.*: The effect of increase in urban temperature on the concentration of photochemical oxidants. *Atmos. Environm.* 43 (2009) Nr. 14, S. 2348-2359.
- [88] *Kuttler, W.; Weber, S.*: Urban climate and global climate change – a case study of the 'Ruhr area', Germany. In: *Mayer, H.; Matzarakis, A.* (Hrsg.): 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology. *Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg* (2009) Nr. 18, S. 313-319.