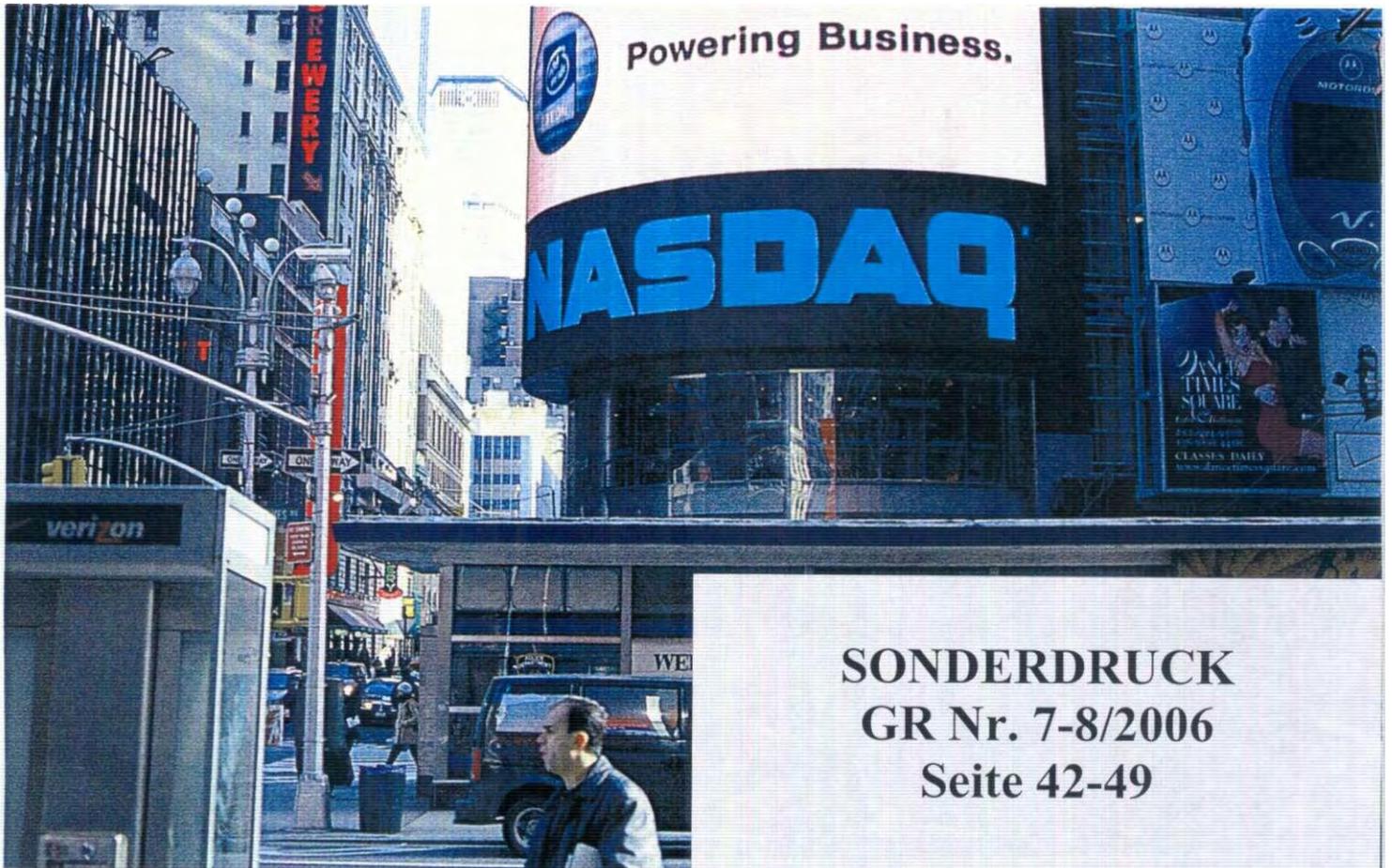


Geographische Rundschau



Forum: Beispiele angewandter Stadtklimatologie

Neu belebt: Tankbewässerung in Andhra Pradesh

Angewandte Stadtklimaforschung in deutschen Großstädten

Aktuelle Beispiele aus Essen und Osnabrück

Durch zunehmendes urbanes Flächenwachstum und gesteigertes Umweltbewusstsein haben die Wechselwirkungen zwischen Klima, Städtebau und Lufthygiene eine immer größere Bedeutung erlangt. Aufbauend auf der stadtklimatologischen Grundlagenforschung hat sich daher in den vergangenen Jahrzehnten insbesondere in Deutschland die Angewandte Stadtklimaforschung als praxisorientierter Forschungszweig etabliert. Nach einem Überblick über Grundzüge und besondere Merkmale des Stadtklimas sollen im Folgenden die Ergebnisse aktueller stadtklimatologischer Untersuchungen in den Städten Essen und Osnabrück vorgestellt werden.

Die Stadtklimaforschung beschäftigt sich mit der Analyse, Bewertung und Prognose der klimatischen und lufthygienischen Situation in Städten und industriellen Ballungsräumen. Zu den derzeit wichtigen Forschungsfragen der Stadtklimatologie zählen die Bedeutung des urban emittierten atmosphärischen CO_2 für den globalen Kohlenstoffkreislauf, die Analyse der räumlichen und zeitlichen Verteilung des Urbanen Aerosols sowie die Effektivität städtischer Luftleitbahnen, über die Kalt- bzw. Frischluft vom Umland in die Städte gelangen kann.

Eines der aktuell drängendsten Probleme im Bereich der städtischen Lufthygiene stellt die hohe Konzentration luftgetragener Partikel (Aerosole) in der Atemluft dar. Nicht zuletzt durch die am 01.01.2005 in Kraft getretene EU-Richtlinie über zulässige Grenzwerte für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$ (PM_{10} , „Feinstaub“) ist diese Problematik auch ins Bewusstsein

einer breiteren Öffentlichkeit gerückt (siehe dazu die Ausführungen weiter unten).

Grundzüge und besondere Merkmale des Stadtklimas

Das Stadtklima ist auf die Bebauung, Versiegelung und urbane bzw. industrielle Nutzung der Stadtfläche zurückzuführen. Hierbei wird es im Einzelnen durch die folgenden drei Faktoren beeinflusst:

- Umwandlung der natürlichen Bodenoberfläche in überwiegend aus künstlichen Materialien bestehende, versiegelte Flächen mit einer ausgeprägten dreidimensionalen Strukturierung;
- Reduzierung der mit Vegetation bedeckten Flächen;
- Freisetzung von gasförmigen, flüssigen und festen Luftbeimengungen sowie von technisch erzeugter Abwärme.

Die genannten Faktoren prägen die Zusammensetzung und den Energiegehalt der Atmosphäre, den Strahlungs- und Wärmehaushalt der Oberflächen sowie den Luftaustausch zwischen Stadt und

Umland. Sie führen zu einem Erscheinungsbild des Stadtklimas (vgl. Kuttler 2004a und 2004b), das weltweit eine ähnliche Beschaffenheit hat und lediglich in thermischer Hinsicht eine gewisse Abhängigkeit von der Breitenlage aufweist (vgl. Wienert und Kuttler 2005).

Die spezifischen Merkmale des Stadtklimas lassen sich am besten anhand eines Stadt-Umland-Vergleichs herausarbeiten. Die klimatischen und lufthygienischen Unterschiede zwischen Stadt und Umland treten hierbei besonders deutlich während hochdruckbestimmter, schwachwindiger Strahlungswetterlagen im Sommer hervor, da diese das autochthone (eigenbürtige) Lokalklima am stärksten zur Entfaltung bringen. Eine Übersicht über die Charakteristika des Stadtklimas in mitteleuropäischen Großstädten bietet Tab. 1.

Strahlungs- und Energiehaushalt

Die bei Strahlungswetterlagen über Großstädten sichtbaren Dunstglocken, die aus gas- und



Foto: B. Bongardt

Foto 1: Messwagen zur kontinuierlichen Erfassung von meteorologischen Größen sowie Partikelimmissionskonzentrationen

partikelförmigen Spurenstoffen bestehen, schwächen die solare Einstrahlung und beeinflussen den Energiehaushalt. Die **Globalstrahlungswerte** variieren sowohl in Abhängigkeit von der jahreszeitlich schwankenden Luftverunreinigung als auch von der Höhe des Sonnenstandes (Deklination, Azimut). Grundsätzlich ist aufgrund der Streuungsprozesse in der Stadtatmosphäre davon auszugehen, dass der Anteil der diffusen Strahlung größer ist als derjenige der direkten Strahlung, was u.a. der natürlichen Innenraumbeleuchtung von Gebäuden zugute kommt. Durch die im Vergleich zum Umland erhöhte Partikelkonzentration und die je nach Wellenlänge unterschiedlich starke Reflexion und Streuung erscheint der Stadthimmel an Strahlungstagen meist weniger intensiv blau als im Freiland.

Die Intensität der kurzwelligen Reflexion (**Albedo**) an der Stadt-oberfläche ist von deren Exposition zur Einfallrichtung der Sonne sowie von der jeweiligen Flächenfarbe abhängig. Im Allgemeinen weist die Albedo ähnliche Werte wie das unbewaldete Freiland auf. Bei Städten mit einem hohem Anteil an hellen Gebäudeoberflächen können die Werte im Mittel allerdings durchaus höher als im Umland ausfallen, was sich unmittelbar auf die lokale Strahlungsbilanz auswirkt. Im Gegensatz dazu sind die Werte der aus dem Halbraum über der Stadt zum Boden gerichteten langwelligen atmosphärischen **Gegenstrahlung** im Allgemeinen erhöht. Dies ist nicht nur auf die höhere Konzentration von infrarotaktiven Gasen (z.B. H₂O, CO₂) und Partikeln in der Stadtluft zurückzuführen, sondern auch darauf, dass die Stadtatmosphäre – insbesondere bei schwachwindigen Wetterlagen – wärmer als die Umlandluft ist. Dadurch wird eine stärkere langwellige Ausstrahlung auch in Richtung der bebauten Stadtfläche verursacht.

Die ultraviolette Strahlung (**UV-Strahlung**; $\lambda = 100\text{--}400\text{ nm}$) wird in der verschmutzten Stadtatmosphäre überproportional

Tab. 1: Stadtklima-Charakteristika einer Großstadt in den mittleren Breiten

Klimaelemente	Veränderungen gegenüber dem nicht bebauten Umland
Globalstrahlung (horizontale Fläche)	bis - 10 % ¹⁾
Albedo	±
Gegenstrahlung UV-Strahlung	bis + 10 %
* im Sommer	bis - 5 %
* im Winter	bis - 5 %
Sonnenscheindauer	
* im Sommer	bis - 8 %
* im Winter	bis - 10 %
Wärme	
* fühlbarer/sensibler Wärmestrom (Q _H)	bis + 50 %
* latenter Wärmestrom (Q _E)	bis - 50 %
* Bowen-Verhältnis (Bo = Q _H /Q _E)	> 1 (im Mittel)
Wärmespeicherung (Q _S)	bis + 40 %
Lufttemperatur	
* Jahresmittel	ca. + 2 K
* Winterminima	bis + 10 K
* in Einzelfällen	bis + 15 K
Wind	
* Geschwindigkeit	bis - 20 %
* Richtungsböigkeit	stark variierend
* Geschwindigkeitsböigkeit	erhöht
Luftfeuchtigkeit	±
Nebel	
* Großstadt	weniger
* Kleinstadt	mehr
Niederschlag	
* Regen	mehr (leeseitig)
* Schnee	weniger
* Tauabsatz	weniger
Bioklima	
* Vegetationsperiode	bis zu zehn Tage länger
Dauer der Frostperiode	bis - 30 %
Luftverunreinigungen	
* CO, NO _x , AVOC ²⁾ , PAN ³⁾	mehr
* O ₃	weniger (jedoch höhere Konzentrationsspitzen)

Quelle: Kuttler 2004 a (verändert)

1) in früheren Phasen der Industrialisierung durch höhere Emissionen wesentlich stärkere Reduktion (vgl. Kuttler und Schaefers 2000)

2) = anthropogenic volatile organic compounds, anthropogene Kohlenwasserstoffe

3) = Peroxiacetylnitrit

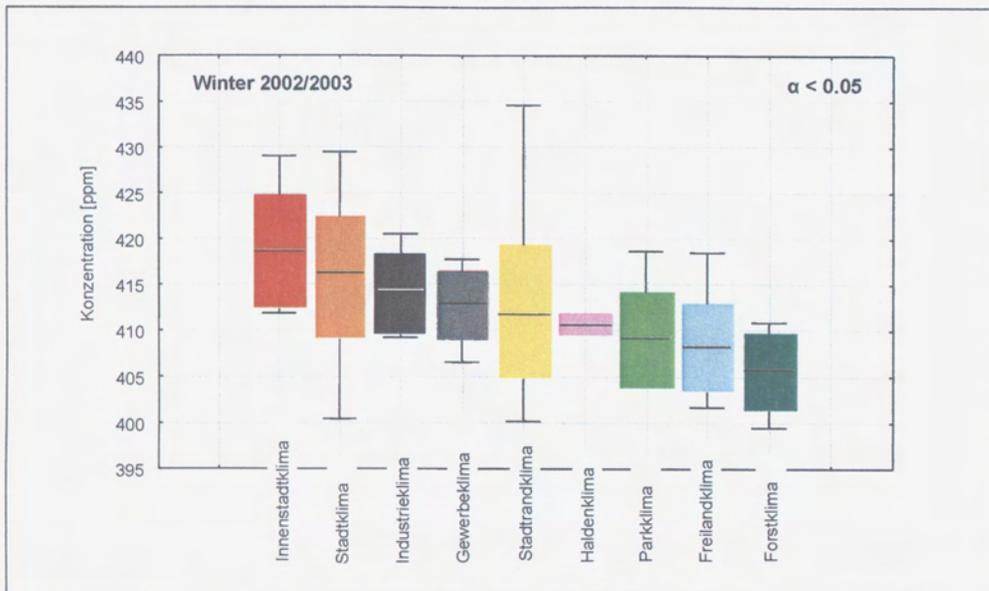


Abb. 1: Mittlere CO₂-Konzentrationen für verschiedene Flächennutzungstypen in Essen

Quelle: Henninger 2005;
Grafik: S. Henninger

Die Abbildung ist in Form einer Box-Whiskers-Darstellung aufgebaut. Gekennzeichnet sind Mittelwert und Standardabweichung (Kästen) sowie das Maximum und Minimum der CO₂-Konzentrationen.

Datengrundlage: Mobile Messungen
Dezember 2002 – November 2003

ppm: Parts per Million
α: Irrtumswahrscheinlichkeit

herausgefiltert und weist insbesondere in den Wintermonaten deutlich niedrigere Werte als im Umland auf. Die lokale Sonnenscheindauer ist in Städten aufgrund der bebauungsbedingt größeren Beschattung generell verkürzt, wobei Exposition, Höhe und Bestandsdichte der Gebäude eine kleinräumliche Differenzierung bedingen.

Wärmehaushalt

Die turbulenten Ströme der fühlbaren (Q_H , Lufterwärmung) und der latenten Wärme (Q_E , Verdunstungskälte) sind in Stadtgebieten gegenüber dem Freiland stark verändert. Eine wichtige Rolle spielen hier neben der jeweiligen Flächennutzung auch die aktuell vorherrschende Witterung (Einfluss des atmosphärischen Austauschverhaltens) sowie die Tages- und Jahreszeit. Der zur Charakterisierung der beiden Wärmeströme häufig herangezogene Verhältniswert Q_H/Q_E liegt im Mittel meist deutlich über 1, sodass Q_H einen hohen Einfluss auf die Stadtatmosphäre besitzt. Der nach dem amerikanischen Astronomen Bowen (1898–1971) Bowen-Verhältnis genannte Quotient ($Bo = Q_H/Q_E$) ist eine vielfach verwendete Größe, wenn es darum geht, anzugeben, ob Energie überwiegend zur Erwärmung der Luft ($Bo > 1$) oder zur Verdunstung von Wasser ($Bo < 1$) aufgewendet wird.

Die tagsüber in Gebäuden, Straßen und Plätzen gespeicherte Wärme (Q_S) stellt aufgrund ihrer überwiegend hohen Werte ein weiteres, wichtiges Element der urbanen Energiebilanz dar. Durch sie wird bei fehlender Einstrahlung (z.B. nachts) Wärme an die Stadtluft abgegeben. In thermischer Hinsicht sind Städte somit als „Tagspeicher“ bzw. „Batterie“ aufzufassen (vgl. Parlow 1998).

Im Ergebnis sind die städtischen **Lufttemperaturen** im Vergleich zum Umland um 1 bis 2 K im Jahresmittel erhöht. Allerdings können je nach Stadtgröße und -struktur, einwohnerbezogenem Energieverbrauch (vgl. Böhm 1998), Wetterlage sowie Tages- und Jahreszeit erhebliche Abweichungen von diesen Werten auftreten, die im Einzelfall – insbesondere nachts – durchaus 10 K bis 15 K betragen können (vgl. Tab. 1). Sichtbare Auswirkungen der erhöhten mittleren Stadttemperatur sind vor allem die Zusammensetzung der Großstadtfloora (vgl. Wittig 1996), vorgezogene Blüh- und Reifephasen der Vegetation sowie im Vergleich zum Umland deutlich längere Vegetationsperioden (vgl. Defila 1999).

Städtisches Windfeld

Städte weisen gegenüber dem Umland geringere mittlere **Windgeschwindigkeiten** auf, da die aufgrund der Bebauung erhöhte

Bodenrauigkeit die Luftströmung abbremsst. Der atmosphärische Austausch nimmt im Allgemeinen niedrige Werte an, sodass sich u.a. die Luftqualität in den Straßenschluchten verschlechtert und die nächtliche Überwärmung kaum abgeführt wird. Allerdings ist an Gebäudekanten und in Nachlaufwirbeln in Lee von Gebäuden eine erhöhte Böigkeit der Windgeschwindigkeit zu verzeichnen (wobei die Richtungsböigkeit stark variiert; vgl. Bottema 1993).

Luftfeuchtigkeit und Nebel

Aufgrund der eingeschränkten Evapotranspiration und des beschleunigten (und zumeist verdunstungsgeschützten) Wasserabflusses nach Niederschlägen weist die **absolute Luftfeuchtigkeit** in Städten im Allgemeinen verringerte Werte auf, was sich insbesondere tagsüber bemerkbar macht. Erhöhte nächtliche Oberflächentemperaturen können jedoch das Einsetzen des Tauabsatzes im Vergleich zum kühleren Umland verzögern oder diesen sogar gänzlich verhindern, so dass sich zeitweilig – in Abhängigkeit von den lokalen Standort- und Witterungsverhältnissen – auch eine erhöhte absolute Luftfeuchtigkeit einstellen kann („Urban Moisture Excess“, UME; vgl. Mayer, Matzarakis und Iziomon 2003).

Nebel tritt – insbesondere in Großstädten – seltener als im Umland auf, was auf die geringere

Kondensationskerndichte, die höheren Lufttemperaturen und die geringere Luftfeuchtigkeit zurückzuführen ist (vgl. *Sachweh* 1997). In Lee urbaner Siedlungsräume hingegen können verstärkt Niederschläge auftreten, was in der Summe jedoch keine Erhöhung, sondern lediglich eine räumliche Umverteilung der Niederschläge darstellt (vgl. *Schütz* 1996).

Luftverunreinigungen

Im Gegensatz zu früheren Jahren, in denen Industrie- und Hausbrandemissionen (Grobstaub und SO_2) dominierten, wird die Luftverunreinigung in mitteleuropäischen Ballungsräumen heute vorwiegend durch Kfz-Emissionen verursacht. Neben den atmosphärischen Spurenstoffen (CO , NO , NO_2 , O_3) und - trotz Einführung des Katalysators - anthropogenen Kohlenwasserstoffen (AVOC) spielen hier vor allem Feinstaub und Ruß (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, ultrafeine Partikel) eine gewichtige Rolle. Darüber hinaus kommt dem im städtischen Bereich emittierten CO_2 wegen seiner globalen Klimawirksamkeit („Treibhausgas“) eine besondere Bedeutung zu (siehe nachfolgende Ausführungen).

Fallbeispiele zur Angewandten Stadtklimaforschung

CO_2 in der Stadtatmosphäre

Das im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung der Erdatmosphäre bedeutsame infrarotaktive CO_2 wird fast ausschließlich in **Urbanen** Ballungsräumen emittiert, obwohl diese nur einen kleinen Teil der Landoberfläche der Erde einnehmen. Über das Immissionsverhalten von CO_2 auf der städtischen Maßstabebene ist bisher wenig bekannt, insbesondere mit Hinblick auf die Abhängigkeit von der **Urbanen** Flächennutzung. Aus diesem Grunde wurden im Stadtgebiet von Essen über den Zeitraum von einem Jahr (Dez. 2002 - Nov. 2003) Untersuchungen zur kleinräumigen Differenzierung der bodennahen CO_2 -Konzentration durchgeführt.

Auf der 210 km^2 großen Essener Stadtfläche wurden im Jahr

Tab. 2: Bestimmtheitsmaße (r^2) für den statistischen Zusammenhang zwischen den Konzentrationen von CO_2 und den Luftschadstoffen CO und NO in Essen

	Winter		Sommer	
	CO	NO	CO	NO
Tagsüber	0,54	0,69	0,39	0,45
Nachts	0,16	0,22	0,07	0,07

Quelle: eigene Berechnungen

Datengrundlage: Henninger 2005

Messzeitraum: Winter 2002-Sommer 2003

Bestimmtheitsmaß: Quadrat des Korrelationskoeffizienten r ; 0 = kein Zusammenhang, 1 = vollständiger Zusammenhang

2004 insgesamt 5,8 Mio. t anthropogenes CO_2 emittiert. Daran waren Emissionen aus Kraftwerken zu 38 %, aus Haushalten zu 24 %, aus Industrie/Gewerbe zu 21 % und aus dem Kraftfahrzeugverkehr zu 17 % beteiligt (vgl. *Henninger* 2005). Aufgrund der unterschiedlichen effektiven Höhenlage der Emissionsquellen entsprechen diese Anteilswerte allerdings nicht zwingend auch der Verteilung der bodennahen Immissionsanteile, und es ist davon auszugehen, dass niedrig gelegene CO_2 -Quellen (vor allem Kfz-Verkehr) überproportional an der bodennahen CO_2 -Konzentration beteiligt sind.

Die Stadtatmosphäre wies während des einjährigen Messzeitraumes mit rund 410 ppm (parts per million) um etwa 9 % höhere Konzentrationswerte auf als das Umland (377 ppm). Dabei wurden die höchsten Werte im Winter, die niedrigsten Werte hingegen im Sommer gemessen (vgl. *Henninger* 2005).

Untersuchungen zur Abhängigkeit der CO_2 -Konzentration von der Flächennutzung haben gezeigt, dass hier offenkundig ein enger Zusammenhang besteht (vgl. *Abb. 1*). Je weniger stark ein Gebiet versiegelt und städtisch genutzt war, desto geringer fielen die gemessenen Konzentrationswerte aus. Allerdings spielt hier auch die Oberflächenart und -gestaltung eine große Rolle, weil diese die Energiebilanz und den

atmosphärischen Austausch bestimmt. Weitere Einflussfaktoren sind zudem die Straßenrandgestaltung und die Bebauungsdichte.

Eine parallel vorgenommene Messung der atmosphärischen Spurenstoffe CO und NO ließ unter Zuhilfenahme linearer Regressions- und Korrelationsberechnungen Aussagen über die mögliche Herkunft des **Urbanen** CO_2 zu. Da beide Spurengase Verbrennungsprozessen entstammen, liegt es nahe, ihre Herkunft im Kfz-Verkehr und den - vor allem im Winter entstehenden - Hausbrandabgasen zu suchen. Wie der Gegenüberstellung in *Tab. 2* zu entnehmen ist, sind die Werte des Bestimmtheitsmaßes r^2 an Wintertagen gegenüber den jeweiligen Nachtwerten deutlich erhöht. Dies deutet auf eine Beeinflussung der CO_2 -Konzentration durch den Straßenverkehr hin, da dieser tagsüber stärker als nachts ist. Der im Vergleich zum Sommer deutlich engere Zusammenhang zwischen CO_2 - und CO -/ NO -Konzentrationen im Winter (= höhere Werte von r^2) dürfte auf die zusätzliche Emission von Hausbrandabgasen (Heizungsbetrieb) zurückzuführen sein.

Urbane Aerosole

Die Untersuchung urbaner Aerosole ist aufgrund der Vielzahl von potenziellen Emissionsquellen (Verkehr, Industrie, natürliche Quellen) sowie unterschiedlicher physikalischer und chemischer

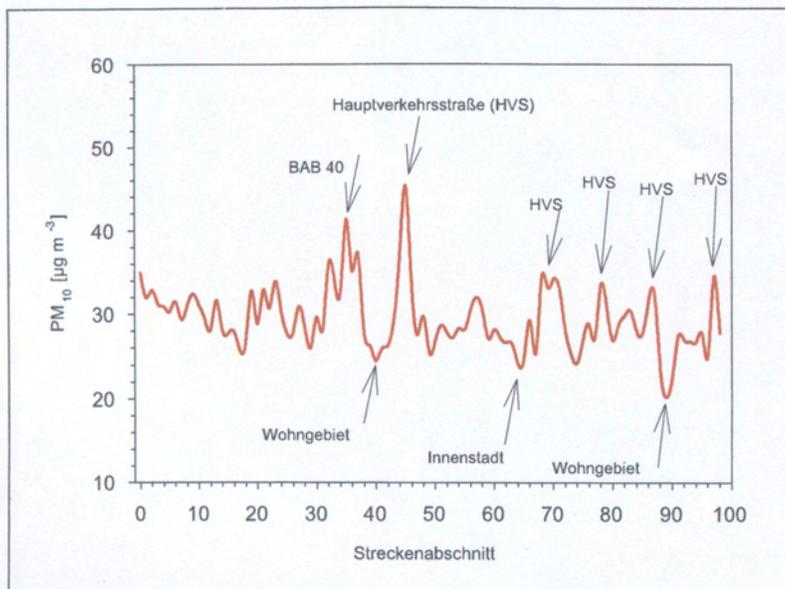


Abb. 2: Median der mobil erfassten PM₁₀-Konzentrationen im Stadtgebiet von Essen

Quelle Abb. 2–5: eigene Darstellung
Grafik/Kartographie Abb. 2–5: S. Weber

Dargestellt sind die PM₁₀-Konzentrationen des jeweiligen Streckenabschnittes.

Datengrundlage: Mobile Messungen entlang einer 47 km langen Messroute (vgl. Abb. 3) im Frühjahr/Sommer 2005 (8 Messfahrten)

PM₁₀: Größenfraktion mit einem aerodynamischen Partikeldurchmesser < 10 µm („Feinstaub“)

PM: particulate matter

Umwandlungsprozesse während des atmosphärischen Transportes äußerst komplex. Aus umweltmedizinischer Sicht ist den Partikeln eine hohe Relevanz beizumessen, da über Anlagerung an ihrer Oberfläche toxische Stoffe eindringen können. Zunehmend rückt deshalb auch die Betrachtung feiner (< 2,5 µm) und ultrafeiner Partikel (< 0,1 µm) ins Interesse von Untersuchungen, da aufgrund ihrer größeren Anzahl und Oberfläche pro Volumeneinheit – in Verbindung mit der Möglichkeit des Vordringens in den menschlichen Körper – ein hohes gesundheitsgefährdendes Potential vorliegt (vgl. Peters et al. 1997, Brunekreef und Holgate 2002, Oberdörster und Utell 2002).

Räumliche Muster der Immissionskonzentration

Die Messung von urbanen Aerosolen wird bisher überwiegend punktuell an wenigen Standorten in Stadtgebieten durchgeführt (z.B. Luftqualitätsüberwachungssystem LUQS, Landesumweltamt NRW, Essen). Eine Übertragung der Punktmessungen auf die Fläche ist aufgrund der komplexen Strömungsprozesse an den einzelnen Standorten (z.B. in Straßenschluchten, siehe unten) nur eingeschränkt möglich. Für eine kontinuierliche Erfassung der Partikel-

konzentrationen in einem größeren Untersuchungsgebiet bieten sich daher mobile Messungen an. Diese werden mit zeitlich hochauflösenden Messgeräten durchgeführt, die auf einem mobilen Geräteträger installiert sind (vgl. Foto 1), so dass eine „quasi-zeitgleiche“ Messung (Momentaufnahme) in einem Untersuchungsgebiet erfolgen kann (vgl. Kuttler 1993).

In der nachfolgend vorgestellten Untersuchung wurden dabei im Frühjahr/Sommer 2005 auf einer rund 47 km langen Messroute im Essener Stadtgebiet die Massenkonzentrationen (µg/m³) in den Größenfraktionen PM₁₀, PM_{2,5} und PM₁ (aerodynamischer Durchmesser < 10 µm, < 2,5 µm und < 1 µm) in Zeitintervallen von 6 s erhoben und zu Streckenabschnittsmittelwerten zusammengefasst. Die Länge der Streckenabschnitte betrug dabei rund 500 m.

Abb. 2 zeigt den Medianwert der in acht Messfahrten erfassten PM₁₀-Konzentrationen. An verschiedenen Tagen können die lokalen PM₁₀-Immissionskonzentrationen – z.B. durch die Schwankung der regionalen Hintergrundwerte – dabei stark differieren. Als Einflussfaktoren kommen hier u.a. die übergeordnete Luftströmung sowie die Vorbelastung durch Emissionen unterschiedlicher Herkunft in Betracht (z.B. Auftreten erhöhter Partikelkonzentrationen bei stabiler

Luftschichtung bzw. geringer Mischungsschichthöhe).

Obwohl eine gewisse räumliche Variabilität der PM₁₀-Konzentrationen innerhalb des Stadtgebietes vorhanden war, ließen sich innerhalb der verschiedenen Messfahrten deutlich wiederkehrende räumliche Muster erkennen. Es zeigte sich, dass der Straßentypus bzw. die Verkehrsintensität einen wichtigen Einfluss auf die Immissionskonzentration ausübte. So waren Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen (Hauptverkehrsstraßen, Bundesautobahn) durch höhere Werte charakterisiert, während Bereiche mit niedrigem Kfz-Aufkommen (z.B. Nebenstraßen in Wohngebieten) geringere Konzentrationsniveaus aufwiesen. Mittlere Maxima wurden mit rund 46 µg/m³ an Hauptstraßen, mittlere Minima mit etwa 21 µg/m³ entlang von Seitenstraßen in Wohngebieten ermittelt. Die Darstellung der normierten PM₁₀-Konzentrationen in Abb. 3 lässt erkennen, dass positive Abweichungen vom Messfahrtmittel (rote Symbole) sich ausnahmslos entlang von Hauptverkehrsstraßen mit hohem Verkehrsaufkommen fanden, während entlang der weniger frequentierten Strecken niedrigere Konzentrationen (blaue Symbole) vorherrschten. Im Essener Süden beispielsweise, der durch eine suburbane bis rurale Flächennutzung gekennzeichnet ist, traten positive Abweichungen

Abb. 3: Normierte PM₁₀-Konzentrationen im Stadtgebiet von Essen

Kartengrundlage: Übersichtsplan Stadt Essen, 1:100 000

Normierte PM₁₀-Konzentration: Abweichung der Streckenabschnittsmittelwerte vom Gesamtmittelwert der Messfahrten. Zur Berechnung siehe Karteneinsatz.

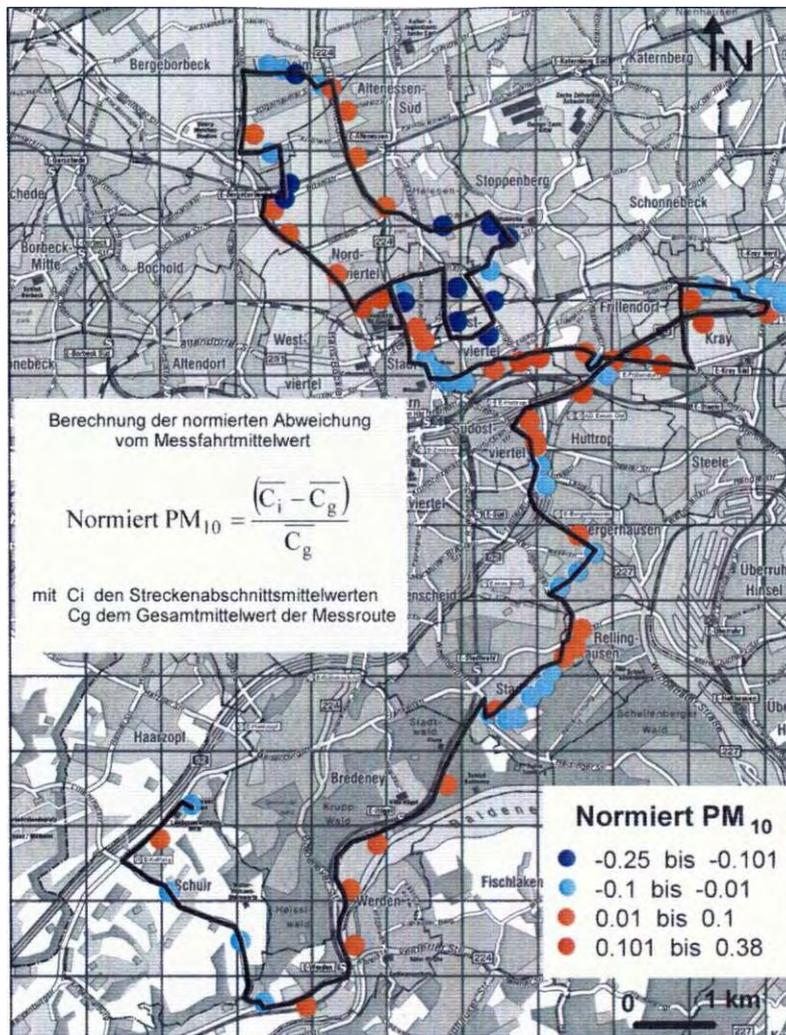
Datengrundlage: Mobile Messungen im Frühjahr/Sommer 2005 (8 Messfahrten).

der Konzentrationswerte entlang von solchen Hauptstraßen auf, die über durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken (DTV-Werte) > 15 000 Kfz/24 h verfügten. Die Essener Innenstadt wies aufgrund der eingeschränkten Kfz-Bewegungen auf den verkehrsberuhigten Straßen geringere Partikelkonzentrationen auf. Die statistische Absicherung dieser Ergebnisse und die Analyse der räumlichen Variabilität feiner Partikel wird Gegenstand der zukünftigen Forschungsarbeit sein.

Konzentrationsdynamik in Straßenschluchten

Straßenschluchten (street canyons) gelten als „Hotspots“ der Schadstoffemission innerhalb von Städten. Die Partikelkonzentrationen sind dabei durch Schwankungen der Verkehrsintensität, der Verkehrsflottenzusammensetzung sowie der übergeordneten Luftströmung einer zeitlichen Variabilität unterworfen. Während einer einmonatigen Messkampagne an einer vielbefahrenen Bundesstraße im Essener Norden (DTV ~ 49 000 Kfz/24 h) im Juli/August 2005 wurde die Konzentrationsdynamik innerhalb der Straßenschlucht in Abhängigkeit von der „unbeeinflussten“ Luftströmung über Dachniveau untersucht. Dazu wurden in mehreren Messhöhen über Grund die dreidimensionalen Windvektoren sowie die Partikelkonzentration erfasst.

Bei senkrechter Anströmung des Windes zur Straßenschluchtachse entwickelte sich eine Rotorzirkulation innerhalb des Canyons,



d.h. die Windrichtung war unterhalb des Dachniveaus einer Drehung unterworfen, so dass sich im Bodenbereich entgegengesetzte Windrichtungen ergaben. Je nach Lage der bodennahen Messstationen konnten durch die von der Rotorzirkulation angetriebene Dispersion der Partikel erhebliche Konzentrationsunterschiede auftreten. Bei leeseitiger Lage der Messstationen innerhalb der Straßenschlucht war durch die Rotation eine Akkumulation der Partikel zu beobachten, während bei luvseitiger Lage eine Verfrachtung/Verdünnung stattfand. Während des Messzeitraums variierten die Konzentrationsunterschiede bei unterschiedlichen Windrichtungen (=Anströmungswinkeln gegenüber der Straßenschluchtachse) um den Faktor 1,5 für Partikel der Größe PM₁₀ bzw. um den Faktor 1,9 für die feinere Fraktion PM_x (vgl. Abb. 4). Für die Aufstellung behördlicher Mess-

stationen zur Überprüfung der gesetzlichen Grenzwerte können solche dynamischen Prozesse von großem Interesse sein.

Effektivität städtischer Luftleitbahnen

Die Ergebnisse stadtklimatischer Forschungsarbeit eignen sich zur Ableitung gezielter planerischer Maßnahmen zur Verbesserung des Stadtklimas, beispielsweise im Hinblick auf die lufthygienische Belastung mit Partikeln und gasförmigen Spurenstoffen oder die nächtliche Überwärmung der Innenstädte. Eine effiziente Möglichkeit stellt hier insbesondere die Gewährleistung eines Luftmasstransportes aus dem nicht versiegelten Umland in die dichter bebauten Innenstädte durch Freihaltung oder Schaffung von raugkeitsarmen Luftleitbahnen dar. Als Luftleitbahnen können freie Grünschnitten, Parkanlagen, Bahntras-

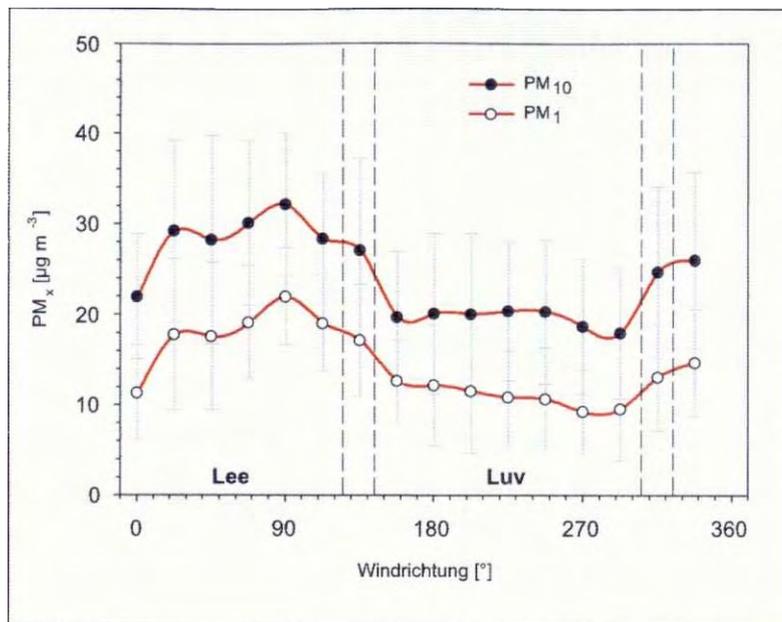


Abb. 4: Variation der Partikelkonzentrationen in Abhängigkeit von der übergeordneten Windrichtung innerhalb einer Straßenschlucht (Größenfraktion PM₁₀, PM₁)

Die Darstellung zeigt die Konzentrations-Mittelwerte in 16 Windrichtungsklassen, die gestrichelten Bereiche markieren den Verlauf der Straßenachse (NW-SE)

Berechnungsbasis: 30 min Mittelwerte des Messzeitraumes 19.07.-18.08.2005

sen oder breite Ausfallstraßen dienen (vgl. Kuttler 1998). Eine stadtklimarelevante Luftleitbahn zeichnet sich neben ihrer geometrischen und aerodynamischen Eignung vor allem dadurch aus, dass hier kühlere und im Idealfall lufthygienisch unbelastete Luft bis in die Innenstadt vordringen kann (vgl. Mayer et al. 1994, Weber und Kuttler 2003).

In der nachfolgend vorgestellten Fallstudie wurde eine Gleisanlage am Güterbahnhof der Stadt Osnabrück hinsichtlich ihrer Eignung als Luftleitbahn untersucht. Die Gleisanlage verbindet das locker bebaute Umland mit dem

Osnabrücker Innenstadtbereich (vgl. Abb. 5). Mit Hilfe von so genannten Tracer-Experimenten wurde während windschwacher sommerlicher Strahlungsächte untersucht, wie weit Kaltluft aus dem Umland über den Güterbahnhof in die Innenstadt Osnabrücks gelangt. Der Luft wurde dazu der Indikatorstoff (Tracer) Schwefelhexafluorid (SF₆) in geringer Konzentration zugesetzt und dann dessen horizontale Ausbreitung im Bereich der Innenstadt analysiert. Es zeigte sich, dass während Strahlungsächten ein Transport kühlerer und lufthygienisch unbelasteter Luft bis in zentrale Innen-

stadtbereiche Osnabrücks erfolgte (vgl. Weber 2004). In Abb. 5 ist exemplarisch die Untersuchungsnacht vom 27./28.07.2001 dargestellt, in der eine horizontale Eindringtiefe von > 1 km (gemessen vom Randbereich des Güterbahnhofes) zu verzeichnen war. Zudem wurden rund 50 % der Fläche der Innenstadt von der Kaltluftausbreitung abgedeckt. Die Ergebnisse dieses Fallbeispiels gelten zwar zunächst nur für den Güterbahnhof in Osnabrück, können aber auch in Hinblick auf andere Städte, in denen Güterbahnhöfe bzw. Gleisanlagen bis in die Innenstädte hineinreichen, zur planerischen Verbesserung des Stadtklimas von Interesse sein.

Ausblick: „Quo vadis Stadtklimaforschung?“

Anhand der vorstehenden Beispiele konnten nur einige aktuelle Arbeitsgebiete aus dem breiten Spektrum der Stadtklimaforschung vorgestellt werden. In

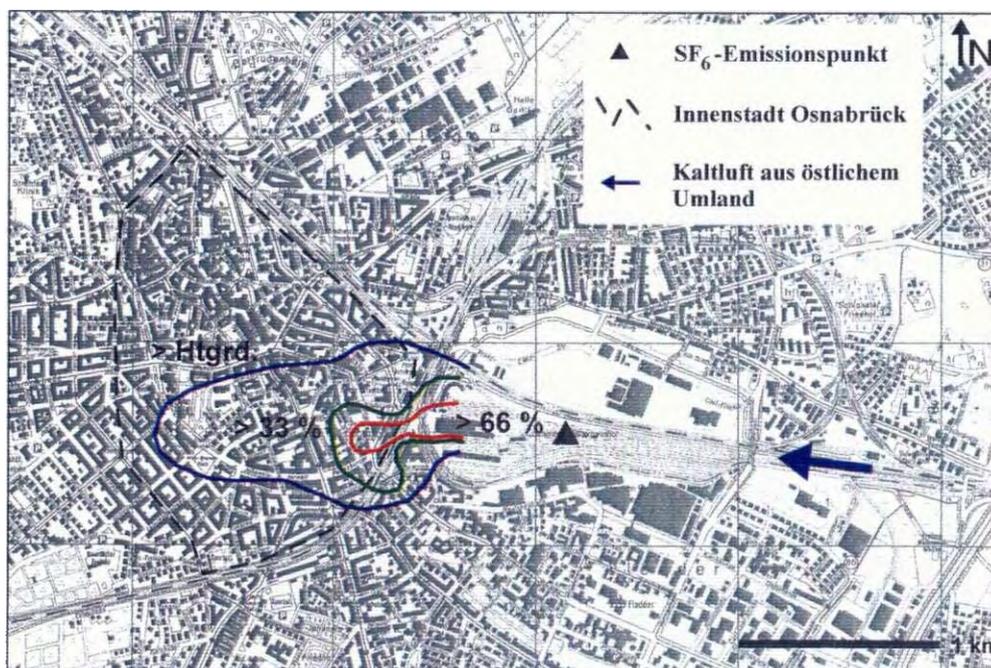


Abb. 5: Ausbreitung des Tracers SF₆ in der Osnabrücker Innenstadt während der Messnacht 27./28.07.2001

Kartengrundlage: Amtlicher Stadtplan der Stadt Osnabrück, 1:15 000

Die Isolinien beziehen sich auf die maximal gemessenen SF₆-Konzentrationen und zeigen Bereiche mit mehr als 66 % der gemessenen Maximalkonzentration (> 66 %), mehr als 33 % der Maximalkonzentration (> 33 %) und mit Werten größer als die atmosphärische Hintergrundkonzentration (> Htrgd.). Das schwarze Dreieck markiert den SF₆-Emissionspunkt.

Deutschland hat sich die Stadtklimaforschung - neben der Grundlagenarbeit an stadtklimatischen Phänomenen und Prozessen - auch anwendungsorientierten Fragestellungen zugewandt. Aus den Ergebnissen der unterschiedlichen Forschungsansätze lassen sich Handlungs- und Lenkungsansätze erarbeiten, die zur planerischen Optimierung des Stadtklimas beitragen können (vgl. Mayer und Matzarakis 2003).

Auch zukünftig werden im Bereich der **Urbanen** Klimaforschung noch eine Reihe offener Fragen und Themenfelder zu bearbeiten sein, die sich - ohne Anspruch auf Vollständigkeit - wie folgt gliedern:

- Standardisierung von **Urbanen** Messungen: Anpassung und Angleichung der Messverfahren zur Bestimmung verschiedener Klimaelemente im Bereich der städtischen Grenzschicht.
- Vertikale Gliederung der Stadtatmosphäre: Erfassung der Strömungs- und Turbulenzeigenschaften der Stadtatmosphäre in Hinblick auf die Dispersion von Luftbeimengungen.
- Kohlendioxid: Analyse der CO₂-Konzentrationen und -flüsse zur Erforschung der Quellen-/Senkendynamik sowie zur Aufstellung von **Urbanen** CO₂-Bilanzen.
- Urbane Aerosole: Bessere Kenntnis der Dynamik, Transformation und Chemie sowie der Emissionsquellen urbaner Aerosole in den verschiedenen Größenfraktionen.
- Verbesserung des Stadtklimas: Umsetzung der Erkenntnisse stadtklimatischer Forschung in stadtplanerische Prozesse (vgl. Barlag 1997).
- *Global Change*: Auswirkung der globalen Klimaänderungen auf der Maßstabebene von Städten, Adaption an die höhere Wahrscheinlichkeit von sommerlichen Hitzewellen.
- Demographischer Wandel, schrumpfende/wachsende Städte: Planerische Eingriffsmöglichkeiten zur Verbesserung des Stadtklimas im Rahmen des

Schrumpfens bzw. Wachsens von Städten.

- **Megacities**: Analyse der stadtklimatischen Phänomene in den schnell wachsenden Megacities der Schwellen- und Entwicklungsländer.

Literatur

- BARLAG, A.-B.: Möglichkeiten der Einflussnahme auf das Stadtklima. VDI-Berichte 1330 (1997), S. 127-146
- BÖHM, R.: Urban Bias in Temperature Time Series - A Case Study for the City of Vienna, Austria. *Climatic Change* 38 (1998), S. 113-128
- BOTTEMA, M.: Wind Climate and urban Geometry. Eindhoven 1993
- BRUNEKREEF, B. und S.T. HOLTGATE: Air Pollution and Health. *The Lancet* 360 (2002), S. 1233-1242
- DEFILA, C.: Der Einfluss des Stadtklimas auf die phänologischen Eintrittstermine. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 150 (1999) H. 4, S. 151-153
- HENNINGER, S.: Analyse der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen am Beispiel der Stadt Essen. *Hohenwarsleben 2005* (Essener Ökologische Schriften, Bd. 23)
- KUTTLER, W.: Planungsorientierte Stadtklimatologie-Aufgaben, Methoden und Fallbeispiele. *Geographische Rundschau* 45 (1993) H. 2, S. 95-106
- Ders.: Stadtklima. In: H. SUKOPP und R. WITTIG (Hrsg.): *Stadtökologie*. Stuttgart 1998, S. 113-153
- Ders.: Stadtklima. Teil 1: Grundzüge und Ursachen. *UWSF, Zeitschrift für Umweltwissenschaften und Ökotoxikologie* 16 (2004a) H. 3, S. 187-199
- Ders.: Stadtklima. Teil 2: Phänomene und Wirkungen. *UWSF, Zeitschrift für Umweltwissenschaften und Ökotoxikologie* 16 (2004b) H. 4, S. 263-274
- Ders.: Stadtklima. In: P. HUPFER und W. KUTTLER (Hrsg.): *Witterung und Klima*. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden 2005, S. 372-432
- KUTTLER, W. und S. SCHAEFERS: On the Detection of intra-urban global Radiation Differences by mobile Measurements. In: *American Meteorological Society: Proceedings of the 3. Symposium on the Urban Environment*. Davis 2000, S. 147-148
- MAYER, H., W. BECKRÖGE und A. MATZARAKIS: Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. *UVP-Report* 5 (1994), S. 265-268
- MAYER, H. und A. MATZARAKIS: Zukunftsperspektiven der Umweltmeteorologie. *Promet* 30 (2003) H. 1-2, S. 57-66
- MAYER, H., A. MATZARAKIS und M.G. IZION: Spatio-temporal Variability of Moisture Conditions within the urban Canopy Layer. *Theoretical and Applied Climatology* 76 (2003), S. 165-179
- OBERDÖRSTER, G. und M.J. UTELL: Ultrafine Particles in the Urban Air: To the Respiratory Tract - And Beyond? *Environmental Health Perspective* 110 (2002), S. A440-A441
- PARLOW, E.: Analyse von Stadtklima mit Methoden der Fernerkundung. *Geographische Rundschau* 50 (1998) H. 2, S. 89-93

PETERS, A., H. WICHMANN, T. TUCH, J. HEINRICH und J. HEYDER: Respiratory Effects are associated with the Number of ultrafine Particles. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 155 (1997), S. 1376-1383

SACHWEH, M.: Natürliche und anthropogene Ursachen rezenter Trends der Nebelhäufigkeit in Süddeutschland. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 141 (1997) H. 2, S.109-115

SCHÜTZ, M.: Anthropogene Niederschlagsmodifikationen im komplex-urbanen Raum. Ergebnisse einer Untersuchung im Ruhrgebiet. *Geowissenschaften* 14 (1996) H. 6, S.249-252

WEBER, S.: Energiebilanz und Kaltluftdynamik einer Urbanen Luftleitbahn. *Hohenwarsleben 2004* (Essener Ökologische Schriften, Bd. 21)

WEBER, S. und W. KUTTLER: Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und -qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 63 (2003) H. 9, S. 381-386

WIENERT, U. und W. KUTTLER: The Dependence of the urban Heat Island Intensity on Latitude - A statistical Approach. *Meteorologische Zeitschrift* 14 (2005) H. 5, S. 677-686

WITTIG, R.: Die mitteleuropäische Großstadtfloora. *Geographische Rundschau* 48 (1996) H. 11, S. 640-646

Autoren

Prof. Dr. WILHELM KUTTLER, geb. 1949
E-Mail: wilhelm.kuttler@uni-due.de
Arbeitsgebiete/Forschungsschwerpunkte: Stadtklimatologie, Lüftthygiene

Dr. STEPHAN WEBER, geb. 1974
E-Mail: stephan.weber@uni-due.de
Arbeitsgebiete/Forschungsschwerpunkte: Grenzschichtklimatologie, Stadtklimatologie, Mikrometeorologie, Aerosole

Institut für Geographie, Universität
Duisburg-Essen, Universitätsstr. 5,
45141 Essen

Summary

Applied Urban Climate Research - The Examples of Essen and Osnabrück

by *Wilhelm Kuttler and Stephan Weber*

This paper gives an overview of the characteristics and modifications of climatological quantities due to the urban structures in the horizontal and vertical dimension. Examples from current research areas in two German cities are introduced: the behaviour and dynamics of urban carbon dioxide and particle concentrations. Finally the benefits of urban ventilation paths, which support urban ventilation and cooling, are described.