

Verkehrsbedingte Immissionen in München

Abstract

The research program "Air Pollution Caused By Motor-traffic In Urban Spaces" (abbreviated by IMKRAL) has been performed in Munich from spring 1989 until spring 1993. The subject of the investigation was to improve the knowledge of spatial distribution and dispersion of air-pollutants (CO, NO, NO₂) that are caused by motor-traffic in urban areas. Also photochemical reactions and products (O₃) of these pollutants have been studied. In this article the methods and some results of case studies that were made in Munich are presented.

One of the car-traverses leads from East to West through the city and was performed on two consecutive days, first with easterly, the next day with westerly wind-conditions. The results showed higher O₃-concentrations in the downwind-plume of the Munich area.

Car-traverses in the centre of Munich for which several measurements were taken, covered different urban structures in a relatively small area. As a result a great spatial variability of air pollutants has been found. For example in a university-campus backyard or in the "Englischer Garten", which is a popular recreation park in the city of Munich, the measured ozone-concentrations were found to be higher than in the surrounding urban area with its greater amount of traffic. Extreme high concentrations of CO and NO_x were found in city-streets with high amount of traffic and inside a road-tunnel for all investigated air pollutants except ozone.

Computer simulations that could be evaluated by measurements showed the wind field in an urban street canyon depending on the wind above roof top level with its corresponding dispersion pattern of CO as a chemical non reactive pollutant.

Zusammenfassung

Während des Zeitraumes von 1989 bis März 1993 wurde in München das Forschungsvorhaben „Immissionen durch den Kraftfahrzeugverkehr in Ballungsräumen“ (IMKRAL) durchgeführt. Untersuchungsziel von IMKRAL war es, die räumliche Verteilung und Ausbreitung verkehrsbedingter Luftschadstoffe (CO, NO, NO₂) sowie die photochemischen Umwandlungen der Schadstoffe (O₃) in städtisch bebauten Gebieten besser zu verstehen. Beispielhaft für die vielfältigen Einzeluntersuchungen aus IMKRAL werden Methodik und Ergebnisse einiger in München durchgeführten Fallstudien vorgestellt.

Bei zwei lufthygienischen Profilfahrten in westöstlicher Richtung, quer durch den gesamten Ballungsraum München, einmal bei östlichem, einmal bei westlichem Wind, konnte die vermehrte Ozonproduktion in der Abwindfahne der Großstadt deutlich gezeigt werden.

Auf einer mehrmals befahrenen Profilroute durch den nördlichen Münchner Innenstadtbereich und den Englischen Garten, bei welcher auf kurzer Strecke unterschiedliche Stadtstrukturen

erfaßt wurden, konnte eine große Variationsbreite der Schadstoffverteilungsmuster festgestellt werden. So wurden beispielsweise in einem Innenhof der Universität sowie im Englischen Garten (innerstädtische Grünanlage) deutlich höhere Ozonkonzentrationen als in den umgebenden Straßenzügen gemessen. In den stark verkehrsbelasteten Straßen und insbesondere innerhalb eines ebenfalls durchfahrenen Tunnels wurden teilweise stark erhöhte Immissionen von CO und NO_x festgestellt.

Durch Modellrechnungen, welche auch durch Messungen untermauert werden konnten, konnten die Strömungsverhältnisse in einer innerstädtischen Straßenschlucht, die sich bei einer Queranströmung durch den Wind über dem Dachniveau einstellen und die daraus resultierende Ausbreitungssituation, für den chemisch inerten Luftschadstoff CO aufgezeigt werden.

Einleitung

Angeregt durch die vielfältigen und wichtigen Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt „Stadtklima Bayern“ (BRÜNDL et al., 1986) entstand nach dessen Abschluß am Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München der Wunsch nach einer Vertiefung der Kenntnisse der lufthygienischen Komponente stadtklimatologischer Fragestellungen. Während der Jahre 1989 bis März 1993 wurde daher im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen das Forschungsvorhaben „Immissionen durch den Kraftfahrzeugverkehr in Ballungsräumen“ IMKRAL (Mayer/Hausteин, 1994) durchgeführt (Abb. 1). Ziel dieses Vorhabens mit Untersuchungsschwerpunkt in München war es, die Ausbreitung, die Verteilung und die chemischen Reaktionen verschiedener verkehrsbedingter Luftschadstoffe innerhalb typischer städtischer Bebauungsstrukturen, wie z.B. verkehrsbelasteter Straßenschluchten, Industriezonen, Parks, Wohngebiete mit hohem Grünanteil sowie Straßentunnel zu untersuchen.

Meßsystem

Im Rahmen von IMKRAL wurden Modellrechnungen zur Luftschadstoffausbreitung sowie experimentelle Messungen durchgeführt. Zur Erfassung der meteorologischen und lufthygienischen Daten im Stadtgebiet wurde ein Meßwagen mit den Meßgeräten und einer für bis zu acht Stunden netzunabhängigen Stromversorgung eingesetzt. Neben der Trocken- und Feuchttemperatur der Luft in drei verschiedenen Höhen (0,5, 1,0 und 2,0 m über Grund), dem dreidimensionalen Windvektor (3,0 m) und der Globalstrahlung (2,0 m) wurden die klassischen Luftschadstoffe (CO, NO, NO₂, O₃ und SO₂) gemessen. Alle diese Meßwerte wurden zehntausendstel auf Datenträger gespeichert. Mit dem Meßfahrzeug war es möglich, sowohl stationäre Messungen an einem bestimmten Ort (mit Netzanschluß auch

über acht Stunden), als auch mobile Messungen in Form einer lufthygienischen Profilmessung durchzuführen (Haustein/Mayer, 1992). Nach der räumlichen Zuordnung der gemessenen Konzentrationswerte stand somit in erster Näherung eine räumliche Verteilung der Schadstoffkonzentrationen entlang der jeweils mit dem Meßfahrzeug durchfahrenen Strecke zur Verfügung.

Ergebnisse

Die im folgenden dargestellten Ergebnisse von Fallstudien aus IMKRAL sollen einen Einblick in die Schwerpunkte der Untersuchungen geben. Eine umfassende Darstellung der Ergebnisse ist in Mayer/Haustein (1994) enthalten.

Großräumige Ozonverteilung in Luv und Lee des Ballungsraumes München

Im Rahmen einer mehrtägigen Intensivmeßphase wurden am 20. und 21. Juli 1992 jeweils in der frühen Nachmittagszeit über etwa 3 Stunden Dauer lufthygienische Profilmessungen entlang einer Traverse von Ost nach West durch den gesamten Ballungsraum München durchgeführt. Startpunkt der Route war dabei jeweils die forstmeteorologische Station des Lehrstuhls für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie im Ebersberger Forst (ca. 90-jähriger Fichtenaltbestand etwa 20 km östlich von München). Der Wendepunkt lag nahe am Gut Freiham westlich außerhalb des Ballungsraumes. Der Routenverlauf führte so direkt wie möglich durch das innere Stadtgebiet von München. Ziel dieser Messung war es, die unterschiedliche Verteilung der primären und sekundären verkehrsbedingten Luftschadstoffe über den gesamten Ballungsraum bei unterschiedlichen Windverhältnissen (Luv bzw. Lee) zu erfassen. An beiden Meßtagen herrschte hochsommerlich sonniges und zunehmend warmes Wetter bei leichter Cumulusbewölkung von 0 bis 2 Achtel, wobei der Wind am 20. Juli aus östlicher und am 21. Juli aus westlicher Richtung kam und eine Geschwindigkeit von etwa 2 bis 4 m/s aufwies.

In den Abb. 1 und 2 sind die O_3 - und NO -Konzentrationen während der Ost-West-Profilmessungen durch München zusammen mit den zeitgleich im Ebersberger Forst durchgeführten stationären O_3 -Referenzmessungen in 2 m (Boden) und 40 m (Bestandshöhe) über Grund dargestellt.

Am 20. Juli 1992, an dem Wind aus östlicher Richtung vorherrschte, stimmen zum Zeitpunkt des Beginns der Profilmessung im Ebersberger Forst die im Meßwagen ermittelten O_3 -Konzentrationen gut mit der Referenzmessung in 2.0 m Höhe über Grund überein. Sie liegen hier bei ca. 55 ppb. Während des Aufenthaltes im Planegger Wald nahe am Gut Freiham im Westen außerhalb von München – bei der vorherrschenden östlichen Windrichtung im Lee des Ballungsraumes – treten unter Berücksichtigung des tageszeitlich bedingten O_3 -Anstieges um bis zu 15 ppb höhere O_3 -Konzentrationen als an der Referenzstation im Osten, d.h. im Luv des Ballungsraumes München, auf. Am Ende der Profilmessung im Ebersberger Forst stimmen die O_3 -Konzentrationen aus dem IMKRAL-Meßwagen und der Referenzmessung in 2.0 m Höhe wieder gut überein. Das einsetzende strahlungsbedingte Auseinanderdriften der O_3 -Konzentrationen in Bodennähe (2 m) und in der Bestandshöhe (40 m) macht sich zu diesem Zeitpunkt bereits bemerkbar.

Am darauffolgenden Tag, dem 21. Juli 1992 (Abb. 2), liegt der Ebersberger Forst aufgrund der dominierenden westlichen Winde im Lee des Ballungsraumes München. Die O_3 -Konzentrationen erreichen hier etwas mehr als 90 ppb und sind somit, bedingt durch die fortschreitende Dauer der Schönwetterlage, deutlich höher als am Vortag. Die O_3 -Konzentrationen der Referenzmessungen in 2.0 m Höhe und 40 m Höhe stimmen gut mit den zeitgleich gemessenen Werten des IMKRAL-Meßwagens überein. Im Planegger Wald – durch den westlichen Wind jetzt

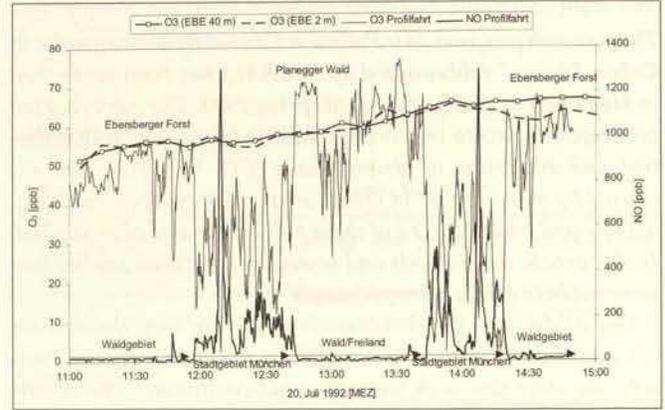


Abb. 1. O_3 - und NO -Konzentrationen am 20.7.1992 (Ostwind) während der Ost-West-Profilmessung durch München sowie im Ebersberger Forst in 2.0 m bzw. 40 m über Grund (EBE 2 m, EBE 40 m)

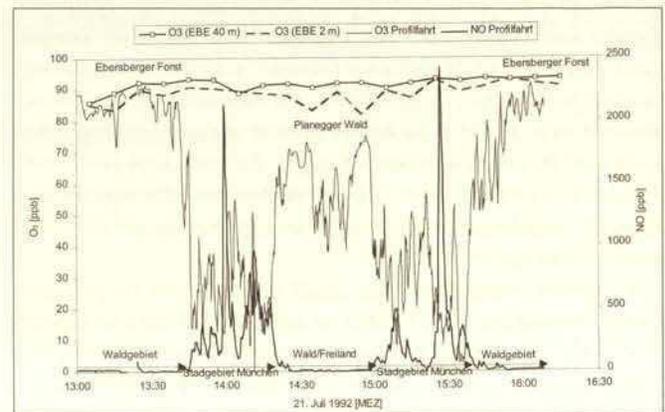


Abb. 2. O_3 - und NO -Konzentrationen am 21.7.1992 (Westwind) während der Ost-West-Profilmessung durch München sowie im Ebersberger Forst in 2.0 m bzw. 40 m über Grund (EBE 2 m, EBE 40 m)

im Luv des Ballungsraumes München – wurden vom IMKRAL-Meßwagen um ca. 15 ppb niedrigere O_3 -Konzentrationen als gleichzeitig an der Referenzstation im Ebersberger Forst gemessen. Bei Ende der Profilmessung an diesem Ort sind die O_3 -Konzentrationen wieder nahezu identisch.

Dieser Luv-Lee-Effekt wird durch photochemische Reaktionen in der Abwindfahne einer Großstadt verursacht. Die im Vergleich zum Umland höheren Stickstoffoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen im Ballungsraum werden durch den Wind in das Lee der Stadt verfrachtet und bilden – mit Hilfe der Sonnenstrahlung – auf diesem Transportweg vermehrt O_3 . Die auslösenden Stickstoffoxide selbst werden durch diese Reaktionen weitgehend aufgebraucht. Nachschub an Stickoxiden ist außerhalb der Stadt kaum mehr vorhanden, wodurch eine verstärkte O_3 -Reduktion verhindert wird. Das nahezu vollständige Fehlen von NO außerhalb des Stadtgebietes ist bei beiden Profilmessungen deutlich zu erkennen (Abb. 1 und 2), während die Durchfahrt durch das

Stadtgebiet von hohen NO-Spitzenwerten gekennzeichnet ist. Durch die ohne Stickstoffoxideinfluß relativ lange Lebensdauer von O₃ von mehreren Tagen oder länger werden die höchsten O₃-Konzentrationen meist in einiger Entfernung zu den Ballungsräumen gemessen, obwohl sie ursprünglich dort durch die Produktion der Vorläufersubstanzen verursacht werden.

Kleinräumige Schadstoffverteilung im innerstädtischen Gebiet

Zur Ermittlung der kleinräumigen Verteilung der wichtigsten verkehrsbedingten Luftschadstoffe wurde in der Umgebung der Münchner Universität (nördlicher Innenstadtbereich) eine Profiliroute (Englischer Garten) ausgewählt, die auf relativ kurze Distanz (Fahrzeit etwa 30 min) einige sehr unterschiedliche städtische Strukturen durchquert (Abb. 3). Dabei konnte die lufthygienische Situation u. a. in einem innerstädtischen Hinterhof, einer stark befahrenen Einfallstraße zum Stadtzentrum, einer großen innerstädtischen Parkanlage sowie innerhalb eines Straßentunnels des Münchner Altstadtringes untersucht werden. Eine derartige räumliche Auflösung der lufthygienischen Situation kann durch die routinemäßig in Großstädten durchgeführten Messungen im allgemeinen nicht erzielt werden. Die dargestellten Ergebnisse stellen eine Auswertung von insgesamt sechs, bei gut vergleichbaren Wetterbedingungen während der Frühjahrs- und Sommerperiode 1991, durchgeführten Meßfahrten dar. Die räumliche Zuordnung für die in Tabelle 1 zusammengefaßten Schadstoffkonzentrationswerte an den zehn typischen Referenzpunkten auf der Fahrtroute ist in Abbildung 3 dargestellt.

Alle Fahrten auf dieser Profiliroute fanden bei Strahlungswet-terlagen mit schwachen bis mäßigen Winden um die Mittagszeit statt. Es waren somit gute Produktionsbedingungen für Photo-oxidantien gegeben. Mit diesem Datenkollektiv war es möglich, mittlere Schadstoffkonzentrationen für die einzelnen Referenzpunkte zu berechnen (vgl. Tab. 1).

Die Konzentrationswerte für NO-, NO₂- und O₃ zeigen deutlich die unterschiedliche räumliche Verteilung der Schadstoffe innerhalb der erwähnten Stadtstrukturen. Während an den nicht unmittelbar vom Verkehr betroffenen Referenzpunkten 1 und 10 (Uni Hinterhof) bzw. 5 (Chinesischer Turm im Englischen Garten) O₃-Konzentrationen von etwa 40 ppb auftreten, sind dort NO₂-Konzentrationen von ca. 20 ppb und NO-Konzentrationen,

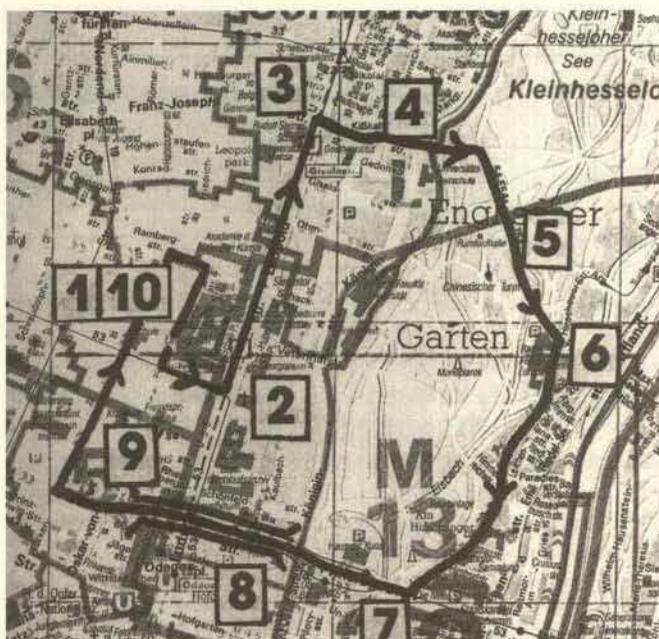


Abb. 3. Lage der lufthygienischen Profiliroute München Englischer Garten mit zehn Referenzpunkten (Ausschnitt aus dem amtlichen Stadtplan München 1:20000, Vergrößerung)

die nahe der Gerätenachweisgrenze liegen, vorhanden. Dieses Verhältnis kehrt sich an den verkehrsbelasteten Punkten 3 (Ecke Leopold-/Martiusstraße) und am Punkt 8 (Altstadtringtunnel) um. Während hier die Ozonkonzentrationen minimal werden, erreichen die Stickoxidkonzentrationen, insbesondere im Tunnelinneren, stark erhöhte Werte. Diese Unterschiede bei den Schadstoffkonzentrationen machen deutlich, daß im innerstädtischen meist dicht bebauten Gelände die Variationsbreite der Luftbelastungen sehr groß ist.

Wind- und CO-Konzentrationsverhältnisse in der Ludwigstraße am 16. Januar 1991

Für den 16. Januar 1991 wurde mit dem Strömungs- und Ausbreitungsmodell MUKLIMO (Sievers/Zdunkowski, 1986) eine Berechnung des Windfeldes für eine Windgeschwindigkeit von 4 m/s und einer Windrichtung von 110° an der Modellobergren-

Punkt	Position	Art der Bebauung	NO		NO ₂		O ₃	
			ppb	%	ppb	%	ppm	%
1	Universität Innenhof	Innenhof	0.009	159	12.5	61	44.1	34
2	Ecke Ludwig-/Schellingstr.	beidseitig	0.008	208	21.7	61	36.3	23
3	Ecke Leopold-/Martiusstr.	beidseitig	0.190	54	63.3	29	15.1	49
4	Einfahrt Englischer Garten (Westseite)	keine	0.084	36	44.2	17	26.0	53
5	Chinesischer Turm	keine	0.010	122	15.8	67	38.8	27
6	Ausfahrt Englischer Garten (Ostseite)	keine	0.012	120	14.2	65	37.1	30
7	Ecke Öttingen-/Prinzregentenstr.	beidseitig	0.038	104	32.5	57	23.3	45
8	Altstadttunnel	Tunnelmitte	1.064	40	92.5	41	8.3	82
9	Ecke Theresien-/Türkenstr.	einseitig	0.629	36	91.7	40	13.3	56
10	Universität Innenhof	Innenhof	0.013	44	17.0	79	34.7	31

Tab. 1. Referenzpunkte auf der lufthygienischen Profiliroute München „Englischer Garten“ sowie die mittlere gemessene NO-, NO₂- und O₃-Konzentrationen und deren Standardabweichung

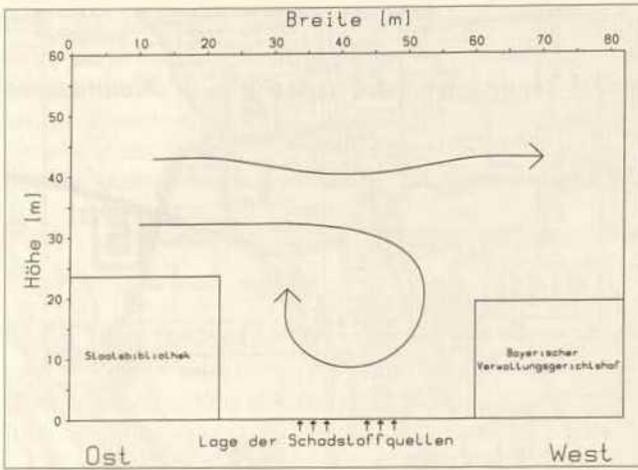


Abb. 4. Schematische Darstellung der Windströmung (Windrichtung 110° , Windgeschwindigkeit 4 m/s) aus der MUKLIMO-Simulation für die Ludwigstraße in München am 16. Januar 1991

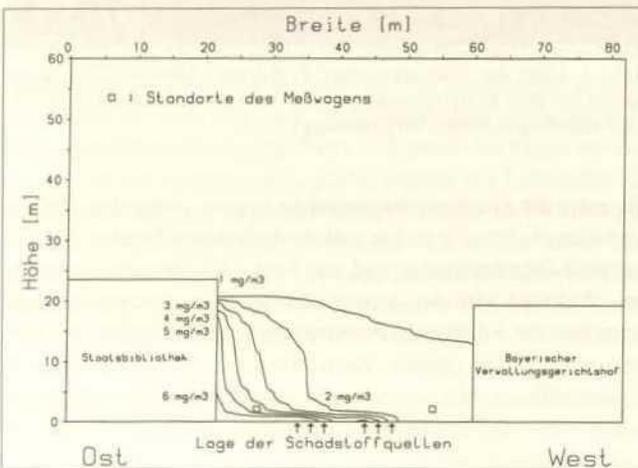


Abb. 5. MUKLIMO-Simulation des CO-Immissionskonzentrationsfeldes in der Ludwigstraße in München am 16. Januar 1991 (Überdachwindrichtung: 110° , Überdachwindgeschwindigkeit: 4.0 m/s; □ = Standort des Meßwagens)

Ludwigstraße	CO (Messung)	CO (Modell)
16. Januar 1991	mg/m ³	mg/m ³
Westseite 10.00-10.30 Uhr	1.5	1.06
Ostseite 10.45-11.15 Uhr	3.9	5.8
Westseite 11.30-12.00 Uhr	1.4	1.06
Ostseite 1.15-12.45 Uhr	4.2	5.8

Tab. 2. Gemessene Halbstundenmittelwerte der CO-Immissionskonzentrationen für die einzelnen Meßzyklen sowie Simulationsergebnisse für CO, bezogen auf die Ost- bzw. Westseite der Ludwigstraße in München am 16. Januar 1991

ze (hier 60 m über Grund) durchgeführt. Diese Windverhältnisse waren während des Untersuchungszeitraumes am 16. Januar 1991 nahezu konstant. Durch die annähernde Queranströmung über dem Dachniveau bildete sich in der Straßenschlucht der Ludwigstraße ein Rotor aus (Abb. 4), der eine Verschiebung des CO-Immissionsfeldes von den Emissionsquellen über der Fahrbahnmitte auf die Leeseite der Straßenschlucht (bezogen auf die Überdachwindrichtung) bewirkte (Abb. 5). Dadurch entstand zwischen beiden Straßenseiten ein ausgeprägter Gradient der CO-Immissionskonzentrationen.

In Abbildung 4 ist die Windströmung in der Ludwigstraße am 16. Januar 1991 als Ergebnis der MUKLIMO-Simulationsrechnung schematisch dargestellt. Die Abbildung 5 zeigt die vom Modell MUKLIMO berechneten Immissionskonzentrationen für CO im Querschnitt durch die Ludwigstraße. Zugleich sind die Standorte des Meßwagens (durch Quadrate □ gekennzeichnet) jeweils auf der Ost- bzw. Westseite dargestellt. Die Meßzeiten, die gemessenen sowie die simulierten CO-Immissionskonzentrationen sind in Tabelle 2 aufgelistet. Hierbei zeigt sich eine gute qualitative Übereinstimmung zwischen Modell und Messung. Erwartungsgemäß werden die Konzentrationsunterschiede zwischen den beiden Straßenseiten vom Modell leicht überschätzt, da die von den Fahrzeugen ausgelösten Turbulenzen und die damit verbundene bessere Durchmischung der Luft in der Straßenschlucht vom Modell nicht erfaßt werden. Das Ergebnis zeigt jedoch, daß im städtisch bebauten Raum kleinräumig deutliche Unterschiede in der Luftqualität anzutreffen sind, besonders bei den primär emittierten Schadstoffen.

Schlußfolgerungen

Anhand der Ergebnisse kleinräumiger Schadstoffverteilungen innerhalb der Münchner Innenstadt kann gezeigt werden, daß ein Stadtbewohner, der beispielsweise im Innenhof einer Wohnanlage oder einer Grünanlage Erholung sucht, nicht unbedingt hohen verkehrsbedingten Schadstoffkonzentrationen, vom photochemischen Folgeprodukt Ozon abgesehen, ausgesetzt sein muß. Größe und Lage der Grünanlage bzw. die Höhe und Art der umgebenden Bebauung von Innenhöfen wirken sich dabei auf die Beträge der Immissionskonzentrationen stark aus. Erhöhte Ozonkonzentrationen sind jedoch, wie die dargestellten Ergebnisse zeigen, an Schönwettertagen im Sommer auch im Umland der Stadt zu erwarten. Die Konzentrationen übersteigen hier sogar diejenigen innerhalb des Stadtgebietes, da das ozonabbauende Stickstoffmonoxid im Umland meist vollständig fehlt.

Diese Ergebnisse zur lufthygienischen Komponente des Stadtklimas stellen eine gute Ergänzung zu den Untersuchungen der thermischen Komponente und der damit verbundenen Behaglichkeit des Menschen im städtischen Raum dar. Die humanbiometeorologische Bewertung wird dadurch aber in ihrer Gesamtheit deutlich komplexer. Eine Entwicklung von brauchbaren Bewertungsmaßstäben für die Stadtplanung, welche alle Wirkungskomplexe gleichermaßen umfassen, sollte das Ziel weiterführender Forschungen sein.

Literatur

- W. BRÜNDL/H. MAYER/A. BAUMGARTNER, 1986, *Stadtklima Bayern*, Abschlußber. zum Teilprogramm „Klimamessungen in München“, StMLU-Materialien Nr. 43
- H. MAYER/C. HAUSTEIN, 1994, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben *Immissionen durch den Kraftfahrzeugverkehr in Ballungsräumen*, StMLU-Materialien Nr. 105
- C. HAUSTEIN/H. MAYER, 1992, *Investigation on Immissions caused by Motor-Traffic using Car-Traverses*, Wiss. Ber. Inst. Meteor. Klimaforsch. Univ. Karlsruhe N2, 16, 73-84
- U. SIEVERS/W. G. ZDUNKOWSKI, 1986, *A Microscale Urban Climate Model*, Beitr. Phys. Atmosph. 59, S. 13-40

Abbildungsnachweis

Alle Abbildungen vom Autor