

FREIBURGER GEOGRAPHISCHE HEFTE

Heft 32

BEITRÄGE ZUR REGIONALEN UND
ANGEWANDTEN KLIMATOLOGIE

W. Weischet zum 70. Geburtstag

Herausgegeben von W. Endlicher und H. Goßmann

Im Selbstverlag des Institutes für Physische Geographie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.

Schriftleitung : Helmut Saurer

1991

ISSN 0071-0048

Zur Anwendung von Windkanaluntersuchungen bei der Lösung immissionsklimatischer Probleme in Stadtgebieten

Wilhelm Kuttler

Zusammenfassung

Die Stadtklimatologie hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten zu einer pragmatisch orientierten Forschungsrichtung entwickelt. Synthetische Klimafunktionskarten und daraus abgeleitete Planungshinweiskarten haben bei den kommunalen Entscheidungsträgern eine breite Aufnahme gefunden. Ein Nachteil der auf generalisierende Aussagen abzielenden Stadtklimakarten besteht allerdings darin, daß sie ausschließlich den klimatischen Ist-Zustand für autochthone Strahlungswetterlagen darstellen. Sollen jedoch zukünftige Planungsmaßnahmen Berücksichtigung finden und hierzu Prognosen über die sich einstellenden klimatisch/lufthygienischen Verhältnisse gestellt werden, ist die Durchführung von Modellrechnungen bzw. von Windkanaluntersuchungen angezeigt. Aufgrund der Komplexität der städtischen Bebauung ist es zur Zeit jedoch noch schwierig, hierzu notwendige Informationen mit Hilfe numerischer Modelle zu erhalten. In den meisten Fällen werden Windkanaluntersuchungen angestrebt. Der nachfolgende Beitrag stellt nach einer kurzen Erörterung der Methodik von Windkanaluntersuchungen Ergebnisse vor, die aus Messungen am Modell einer stark befahrenen Straße im Düsseldorfer Stadtteil Mörsenbroich resultieren. Die Untersuchung sollte Aufschluß darüber geben, inwieweit sich das Immissionsfeld, das im wesentlichen durch Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs geprägt wird, durch Schließung einer Baulücke mit einem sechsstöckigen Bürogebäude verändert. Es konnte nachgewiesen werden, daß die geplante Baumaßnahme nicht unbedingt zu einer Verschlechterung des Immissionsfeldes führt. Im Gegenteil, in der Mehrzahl der Fälle kommt es an den entsprechenden Meßpunkten zu einer deutlich reduzierten Immissionsbelastung gegenüber dem unbebauten Zustand. Nur in wenigen Fällen wird durch das geplante Gebäude die unter Zugrundelegung entsprechender Immissionsgrenzwerte diskutierte Belastung erhöht.

Summary

In the last two decades urban climatology has developed to a pragmatically oriented field of research. Synthetic-functional maps of the climate and derived maps for town planning have widely been accepted by municipal or communal management. However, there is a disadvantage of the generalized urban-climatic maps because they only show the actual climatic state for stable sunny weather conditions. When future planning is done with due regard to forecasts on possible changes of the climatic or air-hygienic conditions, it is necessary to carry out model calculations and/or wind tunnel experiments. Because of the complexity of urban building structures, it is still difficult to acquire necessary information by numeric models. In most cases wind tunnel measurements will have to be carried out. After having illustrated the methods of wind tunnel experiments, the following paper shows results from measurements carried out for a street canyon with dense traffic in Düsseldorf's northern quarter Moersenbroich. This investigation intended to show how the field of immissions - mainly caused by traffic - changes after the construction of a six-storey office building on a remaining free space. It proved that the planned building wouldn't really lead to a deterioration of the field of the immissive situation. On the contrary, in most cases we could measure a reduced amount of pollution compared to the former building structure with a free spot. Only in few cases, the new building led to increased values in proportion to the given threshold values.

Einleitung

Die Stadtklimatologie hat in den vergangenen zwei Jahrzehnten eine erhebliche Wandlung durchgemacht. Von der ursprünglich überwiegend in der Grundlagenforschung angesiedelten, rein akademisch ausgerichteten Fachdisziplin entwickelte sich dieser Zweig der speziellen Klimatologie kontinuierlich zu einer pragmatisch orientierten Forschungsrichtung, die die Anwendung mikro- und mesoklimatischer Analysen des urbanen Siedlungsraumes in den Vordergrund des wissenschaftlichen Interesses stellt (Kuttler 1988). Die angewandte

Stadtklimatologie hat seither im Rahmen kommunaler Planungen einen besonderen Stellenwert bei denjenigen Abwägungsprozessen, die den klimatischen und lufthygienischen Bereich betreffen (vgl. z. B. Jendritzky et al. 1979, Oke 1984, zahlreiche Beiträge in Kirchhofer et al. 1984, Kuttler 1984, Wanner 1986). Veröffentlichungen von Stadtklimaanalysen aus neuerer Zeit enthalten deshalb neben den in den bekannten synthetischen Klimafunktionskarten dargestellten Ergebnissen für die Klimatologie und Lufthygiene bereits daraus abgeleitete Planungshinweise, die in entsprechenden Karten wiedergegeben sind (Stock und Beckröge 1983). Beispiele hierfür liegen für die Städte West-Berlin (Horbert et al. 1983), Lünen (Kuttler 1984) und Recklinghausen (Schreiber 1984, Beckröge et al. o.J.), Karlsruhe (Kaminske 1984), Dortmund (Stock et al. 1986), Wuppertal (Bangert et al. 1988), Bottrop (Barlag et al. 1989) und Moers (Havlik und Stock o.J.) schon vor. Die Nachfrage von seiten der Planungswissenschaften nach diesem Datenmaterial dürfte sich gerade im Hinblick auf die Anwendung der Umweltverträglichkeitsprüfung in der kommenden Zeit noch verstärken (Ahrens 1988).

Diese Entwicklung der Stadtklimatologie mit deutlicher Schwerpunktbildung auf dem angewandten Sektor mit eingeleitet und gefördert zu haben, ist das große Verdienst Wolfgang Weischets, des Nestors der deutschen Klimatologie. Weischet wies bereits frühzeitig darauf hin, daß Ergebnisse stadtklimatologischer Untersuchungen für den Umweltschutz und für die auf städtischer und kommunaler Ebene ablaufenden Planungsentscheidungen insbesondere dann von großem Wert sind, wenn wissenschaftlich exakte Aussagen für möglichst kleine repräsentative Flächen - mithin für Klimatope - gemacht werden können. Viele Stadtklimaanalysen, die seither durchgeführt wurden, arbeiten nach dem Prinzip der von ihm vorgeschlagenen "Baukörperstrukturtypisierung", in der vergleichbare Flächenelemente als repräsentative Klimatope einer Stadt zusammengefaßt sind (Weischet et al. 1977).

1 Untersuchungsmethoden in der Stadtklimatologie

Stadtklimatische Gesamtübersichten in der Darstellung o. g. synthetischer Klimafunktionskarten lassen sich zwar zur Klärung topoklimatischer Probleme kleinerer Flächen für eine allgemeine Aussage heranziehen, aus Maßstabsgründen meist jedoch nicht für die Lösung von Detailproblemen nutzen. Man benötigt deshalb Untersuchungen und vor allem Ergebnisdarstellungen in großem Maßstab, da - wie Weischet es bereits formulierte - eine "Stadt als komplexes Ganzes außerordentlich schlecht klimatologisch verstehend und prognostizierbar ableitend in den Griff zu bekommen (ist)" und deshalb "für eine genetische Stadtklimatologie nach den inzwischen gesammelten Erfahrungen der Schritt von der Gesamtbetrachtung der Stadt zu einer detaillierten Analyse ihrer Teile getan werden (muß)" (Weischet 1979, S. 420). Um dieses Ziel zu erreichen, bedient man sich - je nach zugrundegelegter Fragestellung - verschiedener Analysemethoden, zu denen Geländemessungen, mathematische Modellrechnungen und Windkanaluntersuchungen zählen.

Sind Geländemessungen vorgesehen, so ist die Einrichtung eines stationären und mobilen Meßnetzes notwendig, um relevante Klimaelemente, wie z. B. die trockene und feuchte Lufttemperatur, den Windvektor, eventuell Strahlungskomponenten sowie die Luftqualität anhand des Nachweises festgelegter Indikatoren möglichst flächendeckend zu erfassen. Im Gegensatz zu konventionell betriebenen Stationen, die mit Thermohygrographen und

Woelfle-Windmessern arbeiten, stellt sich bei einer elektronischen Meßwerterfassung mit Dataloggern das Problem einer erwünschten hohen zeitlichen Auflösung nicht. Für die Erfassung der lufthygienischen Parameter stehen Messungen der Konzentration, der Deposition aerosolhaltiger Bestandteile und der Immissionsrate insbesondere überwiegend gasförmiger Bestandteile zur Verfügung (vgl. hierzu Lahmann 1990). Flächendeckende Aussagen können anhand eines auf wenigen fest eingerichteten Stationen beruhenden Meßnetzes meist nicht getroffen werden. Ergänzend sollte hierzu eine mobile Datenerfassung unter Einsatz eines Meßwagens erfolgen, womit eine Vielzahl von Meßpunkten berücksichtigt werden kann. Darüber hinaus wäre - sofern vorhanden - eine Thermalluftbilddauswertung zur unterstützenden Interpretation von Flächen unterschiedlich hoher Oberflächenabstrahlungstemperaturen wünschenswert.

Die genannten Meßmethodiken sind im Prinzip für alle im Bereich von Stadtklimaanalysen gewünschten Maßstabsgrößen problemlos anwendbar. Allerdings besitzen die auf diesem Wege gewonnenen Erkenntnisse kaum prognostischen Charakter. Sie können vielmehr zur Ermittlung des klimatischen Ist-Zustandes eines Raumes herangezogen werden. Wird nun seitens der Stadtklimatologie eine Vorhersage erwartet, die z. B. Auskunft geben soll über eine potentielle Mikroklimaveränderung bei der geplanten Schließung einer Baulücke in einem dicht besiedelten Gebiet oder über die voraussichtliche Immissionshöhe nach Durchführung einer Neuplanung, dann können die oben beschriebenen Methoden allenfalls als Grundlage für eine auf dem Analogieschluß beruhende Plausibilitätsbetrachtung verwendet werden. Sollen Aussagen zu klimatischen Veränderungen unter Berücksichtigung einer Planungsmaßnahme gemacht werden, so muß auf Simulationen mit Hilfe mathematischer Modellrechnungen und/oder auf Untersuchungen im Windkanal zurückgegriffen werden. Wegen der Heterogenität der städtischen Bebauung und der durch die Gebäude hervorgerufenen Bildung lokaler Strömungsverhältnisse im bodennahen Austauschraum sind die für die Beantwortung immissionsklimatischer Fragestellungen notwendigen Informationen auf numerischem Wege meist nicht und wenn überhaupt, dann nur unter großem Zeitaufwand zu ermitteln. Aus diesem Grunde erweist sich häufig eine Untersuchung im Windkanal als angebracht. Beispiele hierfür sind verschiedentlich beschrieben worden, so von Leisen (1978), Plate (1982), Lohmeyer (1984), Schatzmann et al. (1986) und Brilon et al. (1987).

2 Zur Methodik von Windkanaluntersuchungen

Für die Durchführung physikalischer Luftströmungs- und Immissionsmessungen an einem Modell verwendet man mikrometeorologische Grenzschichtwindkanäle, deren prinzipieller Aufbau Abbildung 1 entnommen werden kann. Der eigentlichen Meßstrecke ist auf der einen Seite eine Einlaufdüse mit Turbulenzsieben und eine Anlaufstrecke zur Erzeugung des gewünschten Windprofils vorgeschaltet, während sich auf der anderen Seite der Motor mit der Ansaug- und Gebläsevorrichtung befindet.

Um eine naturähnliche neutrale Grenzschicht im Windkanal zu erzeugen, bedarf es der Übereinstimmung des Windprofils und der Turbulenzeigenschaften zwischen Natur und Modell. Die dynamische Ähnlichkeit zwischen beiden muß gewährleistet sein. Das Windprofil wird dabei durch ein Potenzgesetz nach Gleichung 1 angenähert.

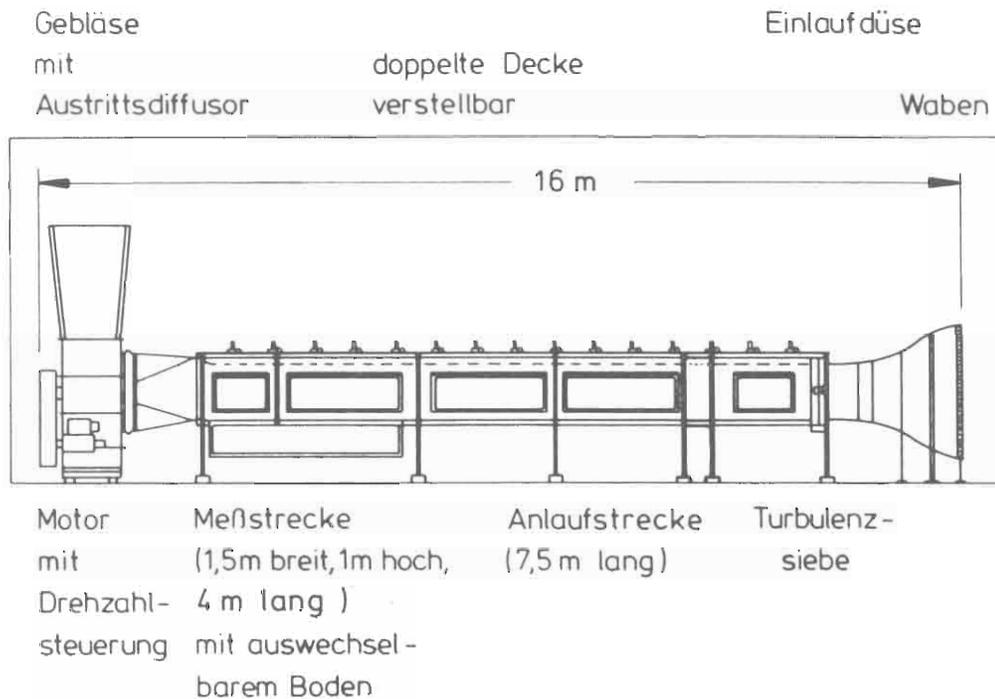


Abb. 1: Grenzschichtwindkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg. Strömungsrichtung von rechts nach links (aus Schatzmann et al. 1986)

$$(1) \quad \frac{u_z}{u_d} = \left(\frac{z}{d} \right)^a$$

u_z = Windgeschw. i.d. Höhe z [m/s]
 d = Grenzschichthöhe [m]
 u_d = Windgeschw. in Grenzschichthöhe [m/s]
 a = Exponent (je nach Rauigkeit
 $0,16 < a < 0,4$)

Ein derartiges Windprofil läßt sich durch den gezielten Einbau von Wirbelgeneratoren und Rauigkeitselementen im Bereich der Turbulenzsieve erzeugen. Abbildung 2 zeigt den Aufbau des gewünschten Windprofils. Die Strömungsrichtung verläuft in diesem Beispiel von links nach rechts. Neben der Berücksichtigung einer diesem Potenzgesetz folgenden Strömungsgeschwindigkeit muß weiterhin beachtet werden, daß sich die Turbulenzeigenschaften, nämlich die Turbulenzintensität und das -spektrum sowie die externen und lokalen Wirbel, ebenfalls naturähnlich entwickeln können. Wichtig ist, daß zur Herstellung einer dynamischen Ähnlichkeit im Modellversuch gewisse dimensionslose Kennzahlen eingehalten werden. Hierbei handelt es sich um die Rossby-Zahl, die Froude-Zahl und die Reynolds-Zahl.

Die Rossby-Zahl (Gl. 2) beschreibt den Einfluß der Erddrehung auf die Windströmung und wird angewendet bei der Erfassung großräumiger Bewegungen in der Atmosphäre.

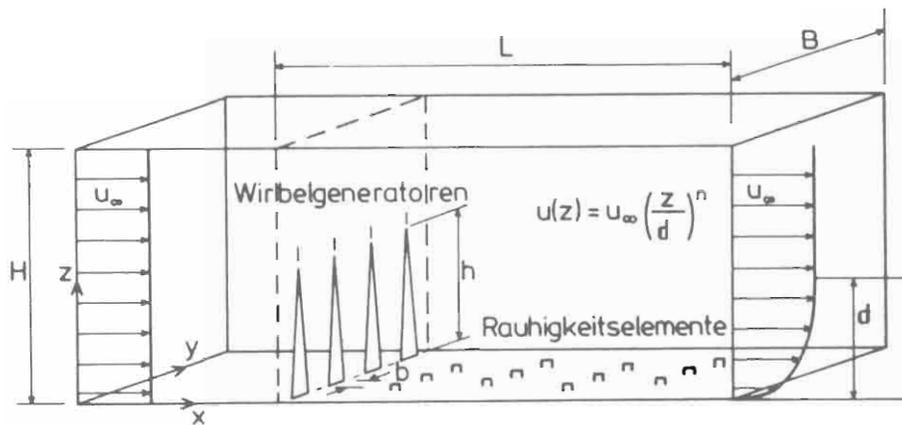


Abb. 2: Erzeugung eines Grenzschichtprofils mit Hilfe von Wirbelgeneratoren und Rauigkeitselementen (aus Schatzmann et al. 1986, verändert)

$$(2) \quad Ro = \frac{u_g}{f z_0}$$

$u_g =$ geostr. Windgeschw. [m/s]
 $z_0 =$ Rauigkeitslänge [m]
 $f = 2 \Omega \sin \phi$
 (Coriolisparameter)

Wird bei der Untersuchung von Ausbreitungsvorgängen im Micro-/Mesoscale innerhalb der bodennahen Grenzschicht eine Raumgröße von maximal 100 m Vertikalerstreckung und bis zu 5 km Horizontalerstreckung nicht überschritten (Plate 1982), kann der Einfluß der Rossby-Zahl vernachlässigt werden. Da aus Raum- und Maßstabsgründen des Windkanals bzw. des Modells die Größe des Untersuchungsgebietes meist sowieso auf diese Maximalwerte beschränkt werden muß, ist eine Berücksichtigung der Rossby-Zahl somit nicht notwendig.

$$(3) \quad Fr = \sqrt{\frac{l}{Ri}}$$

$l =$ Bezugslänge [m]
 $Ri =$ Richardson - Zahl

Mit der Froude-Zahl (Fr) (Gl. 3) wird das Verhältnis der Trägheits- zur Gravitationskraft beschrieben. Sie muß berücksichtigt werden, wenn der Einfluß nicht neutraler atmosphärischer Schichtungsverhältnisse (also von Bodeninversionen oder bodennah ausgebildeten Inversionen) auf das Ausbreitungsverhalten von Schadstoffen im Modell untersucht werden soll. Es ist nach wie vor problematisch, stabile Schichtungsverhältnisse im Windkanal naturentsprechend einzustellen. Für Untersuchungen in bebauten Gebieten stellt sich dieses Problem der Modellierung stabiler Verhältnisse nicht, da selbst bei Vorherrschen von starken Bodeninversionen über den unbebauten stadtnahen Freiflächen sich in der städtischen canopy layer überwiegend eine neutrale bis leicht stabile Schichtung einstellt (Clarke 1969, Beckröge 1989). Die Gründe hierfür sind in einer erhöhten mechanischen Turbulenz

innerhalb des Stadtgebietes zu sehen. Aufgrund dieser Tatsache wird die Froude-Zahl bei Untersuchungen in bebauten Gebieten ebenfalls vernachlässigt.

$$(4) \quad Re = \frac{u * l}{\nu}$$

u = Windgeschwindigkeit [m/s]
 l = Länge, z.B. Gebäudehöhe [m]
 ν = kinematische Viskosität
 (1,5 * 10⁻⁵ m²/s)

Probleme wirft hingegen die Einhaltung der Reynolds-Zahl im Windkanalmodell auf. Die RE-Zahl bestimmt das Verhalten einer Strömung (Gl. 4). So trennt die charakteristische RE-Zahl von 2100 eine laminare (RE kleiner 2100) von einer turbulenten Strömung (RE größer als 2100). In der Natur treten fast ausschließlich turbulente Strömungen auf; d. h. es herrschen im allgemeinen große Reynolds-Zahlen vor. Diese im Windkanal zu erzeugen, bereitet einige Schwierigkeiten, da bei gleicher vorausgesetzter kinematischer Viskosität aufgrund der Kleinheit des Modells im Vergleich zur Realität entsprechend hohe Windgeschwindigkeiten eingestellt werden müßten. Bei einem häufig für Windkanaluntersuchungen verwendeten Maßstab von z.B. 1:500 würde dies eine Windgeschwindigkeit im Windkanal voraussetzen, die um den Faktor 500 höher wäre als diejenige in der Natur. Derartig hohe Geschwindigkeiten lassen sich jedoch kaum im Windkanal erzeugen. Um dennoch große Reynolds-Zahlen, die den natürlichen Verhältnissen in etwa entsprechen, für den Versuchsablauf sicherzustellen, setzt man Störkörper in den Einlauf bzw. bringt Turbulenzgeneratoren auf dem Windkanalboden an, so daß ein ausreichendes Turbulenzspektrum geschaffen wird.

Sind die strömungsmechanischen Voraussetzungen für die Nachbildung der Grenzschicht erfüllt, muß als weitere Forderung ein möglichst der Realität entsprechendes Modell des Untersuchungsgebietes gebaut werden, das aus Gründen der Turbulenzerzeugung über scharfe Gebäudekanten verfügen sollte. Auch muß das Größenverhältnis zwischen Straßenschluchtenlänge (S) und -breite (B) so beschaffen sein, daß sich naturvergleichbare Strömungen entwickeln können. Dieses wird erreicht, wenn Verhältniswerte für S:B von etwa 10:1 vorliegen (Plate 1982). Für den Fall, daß es die Fragestellung verlangt, muß darüber hinaus auch die Verteilung der Baum- und Strauchvegetation in der Realität kartiert und in entsprechender Weise in das Modell eingebracht werden. Ist ferner eine windrichtungsabhängige Untersuchung geplant, bei der für das Untersuchungsgebiet unterschiedliche Belüftungssituationen zu simulieren sind, dann sollte die Größe des Modells so eingerichtet werden, daß dieses auf einen Drehteller im Windkanal gesetzt werden kann; hierdurch wird gewährleistet, daß Messungen unter Berücksichtigung verschiedener Strömungsrichtungen vorgenommen werden können.

$$(5) \quad I = 10^{-6} * \frac{c * u_{10}}{Q}$$

c = Immissionskonzentration [mg/m³]
 u_{10} = Windgeschw. in 10 m Höhe [m/s]
 Q = Quellstärke der Linienquelle [kg/m*s]

Sind neben Windvektoruntersuchungen auch Analysen des Immissionsfeldes, z.B. in der Umgebung einer Straße geplant, so mischt man der Emissionsquelle ein Tracergas - etwa SF_6 - bei und bestimmt für die festgelegten Meßpunkte im Modell, an denen Luft zwecks Analyse abgesaugt wird, hierfür normierte Immissionskonzentrationen (I) (Gl.5). Um die in der Natur vorhandenen Konzentrationen zu berechnen, multipliziert man Gl. 5 mit Q (=Emissionsmassenstrom der Linienquelle in $\text{mg}/\text{m}\cdot\text{s}$ und dividiert durch u_{10} (=Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe in m/s) und erhält so die in der Realität auftretenden Immissionswerte. Werden diese Berechnungen für andere als inerte Gase - z.B. Stickoxide durchgeführt - müssen noch Transferfunktionen berücksichtigt werden. Zur Ermittlung von Q benötigt man die Anzahl der Kfz-Bewegungen pro Zeiteinheit und deren mittlere Fahrgeschwindigkeit. Unter Zugrundelegung der Emissionsfaktoren für verschiedene Fahrmodi lassen sich bei Kenntnis der Länge der Linienquelle für entsprechende Spurenstoffe die Emissionsmassenströme berechnen. Die Daten der Windvektoren entnimmt man der für das Untersuchungsgebiet repräsentativen Klimastation. An einem konkreten Planungsfall sollen nachfolgend einige Ergebnisse, die aus einer Windkanaluntersuchung resultieren, dargestellt und erläutert werden.

3 Immissionsanalyse im Umfeld einer stark befahrenen Straße

Im nördlichen Teil des Stadtgebietes von Düsseldorf, im Grenzgebiet der Stadtteile Mörsebroich (im Osten) und Derendorf (im Westen) sollte auf einer an einer stark befahrenen, vierspurigen Straße liegenden Freifläche, die in einem dem Planungsamt vorliegenden älteren Gutachten als Bestandteil einer potentiellen Luftleitbahn ausgewiesen worden war, ein sechsstöckiges Bürogebäude errichtet werden, von dem zwei Bauvarianten vorgegeben wurden. Das geplante Gebäude ist in einem Bebauungsmischgebiet (Wohn-, Bürogebäude sowie Industrieflächen) eingebettet. Die mittelhohen Wohngebäude, flachen Lagerhallen und wenigen herausragenden Bürogebäude (bis zu 14 Stockwerken) sind in aufgelockerter Bebauungsstruktur errichtet. Sie werden durch zahlreiche Bäume oder Baumgruppen voneinander getrennt.

Da davon ausgegangen werden mußte, daß es durch die geplante Bebauung zu einer nachteiligen Veränderung der Immissionssituation kommt, wurde bei dem Ingenieurbüro Dr.-Ing. A. Lohmeyer, Karlsruhe, eine Windkanaluntersuchung in Auftrag gegeben. Diese sollte klären,

- inwiefern die geplante Bebauung das Immissionsfeld, das insbesondere durch den Kraftfahrzeugverkehr im Untersuchungsgebiet geprägt wird, in unmittelbarer Umgebung der vorgesehenen Baumaßnahme beeinflußt,
- ob von einer Überschreitung der Immissionsgrenzwerte einzelner Spurenstoffe nach Errichtung des Neubaus auszugehen ist und
- welche der beiden seitens des Auftraggebers vorgegebenen Gebäudevarianten die immissionsseitig günstigere darstellt.

Zur Lösung dieser Fragen wurde ein Gebäudemodell in zwei Ausführungsvarianten im Maßstab 1:500 aus hartem Kunststoff angefertigt. Um die Modellsituation möglichst wirklichkeitsnah zu gestalten, wurde darüber hinaus die Verteilung der natürlichen Baum- und Strauchvegetation im Gelände kartiert und nach entsprechenden Arten klassifiziert.

Insgesamt 1.000 Modellbäume und -sträucher wurden anschließend maßstabs- und lagegetreu in das Modell eingebracht. Abbildung 3 zeigt das Untersuchungsgebiet mit den vorgegebenen Grundrissen der Gebäudevarianten A und B. Da man insbesondere eine Aussage über die Beeinflussung der Immissionssituation durch Kfz-Abgase auf der stark befahrenen, vierspurigen Ausfallstraße (Brehmstraße mit etwa 50.000 Kraftfahrzeugen pro Tag) erwartete, wurden - für die Fahrmodi (FM) Stau (FM 6), Stop and Go (FM 5) und fließender Verkehr (FM 3) - unter Berücksichtigung der Emissionsfaktoren und des entsprechenden Kraftstoffverbrauches (Tab. 1) die Quellstärken für die Kfz-spezifischen Schadstoffe CO, C_mH_n, NO_x, SO₂ und Pb berechnet. Basierend auf einer für die Klimastation des Deutschen Wetterdienstes in Düsseldorf-Lohausen durchgeführten Häufigkeitsanalyse der Windvektoren wurden für die Windkanaluntersuchungen letztendlich vier als wichtig erachtete Windrichtungen, nämlich 30°, 150°, 210° und 270°, für die Simulationsanalyse zugrundegelegt. Außerdem erfolgte eine Berechnung der Ausbreitungsklassenverhältnisse nach Klug/Manier.

Tab. 1: Emissionsfaktoren und Kraftstoffverbrauch für Personen- und Kombinationskraftwagen mit Otto- und Dieselmotoren (nach Bayr. Landesamt f. Umweltschutz, 1985)

Fahrmodus		1	2	3	4	0	5	6	
mittlere Fahrgeschwindigkeit	km/h	100 konst.	60	42,5	26	19,5	13,5	6	km/h
Kraftstoffverbrauch	g/km g/h	63,09 6309	66,77 3416	67,95 2890	89,97 2289	105,4 2041	130,5 1710	212,1 1328	g/km g/h
Kohlenmonoxid	g/km g/h	10,84 1084	13,28 799,1	17,38 739,3	24,64 627,3	29,40 569,1	38,83 508,6	68,33 427,7	g/km g/h mg/s
Kohlenwasserstoffe (aus FID-Messung) (angegeben als C ₁ H _{1,85})	g/km g/h	1,03 103,1	1,32 79,5	1,72 73,26	2,43 61,98	2,91 56,43	3,68 48,27	6,12 38,34	g/km g/h mg/s
Stickstoffoxide (angegeben als NO ₂)	g/km g/h	3,55 355,2	1,88 113,2	1,7 73,74	1,65 42,00	1,64 31,76	1,51 19,82	1,43 8,94	g/km g/h mg/s
Schwefeloxide ¹⁾ (angegeben als SO ₂)	g/km g/h	0,049 4,92	0,043 2,58	0,052 2,20	0,069 1,75	0,081 1,57	0,097 1,27	0,152 0,95	g/km g/h mg/s
Blei ²⁾	g/km g/h	0,009 0,91	0,008 0,49	0,009 0,42	0,013 0,33	0,015 0,29	0,019 0,25	0,031 0,19	g/km g/h mg/s
		0,253	0,136	0,117	0,092	0,081	0,069	0,053	mg/s

1) Gerechnet mit einem Schwefelgehalt im Ottokraftstoff von 0,025 % und im Dieselmotorkraftstoff von 0,3 %
2) Gerechnet mit einem Bleigehalt im Ottokraftstoff von 0,15 g/l und 75 % Ausstoß.

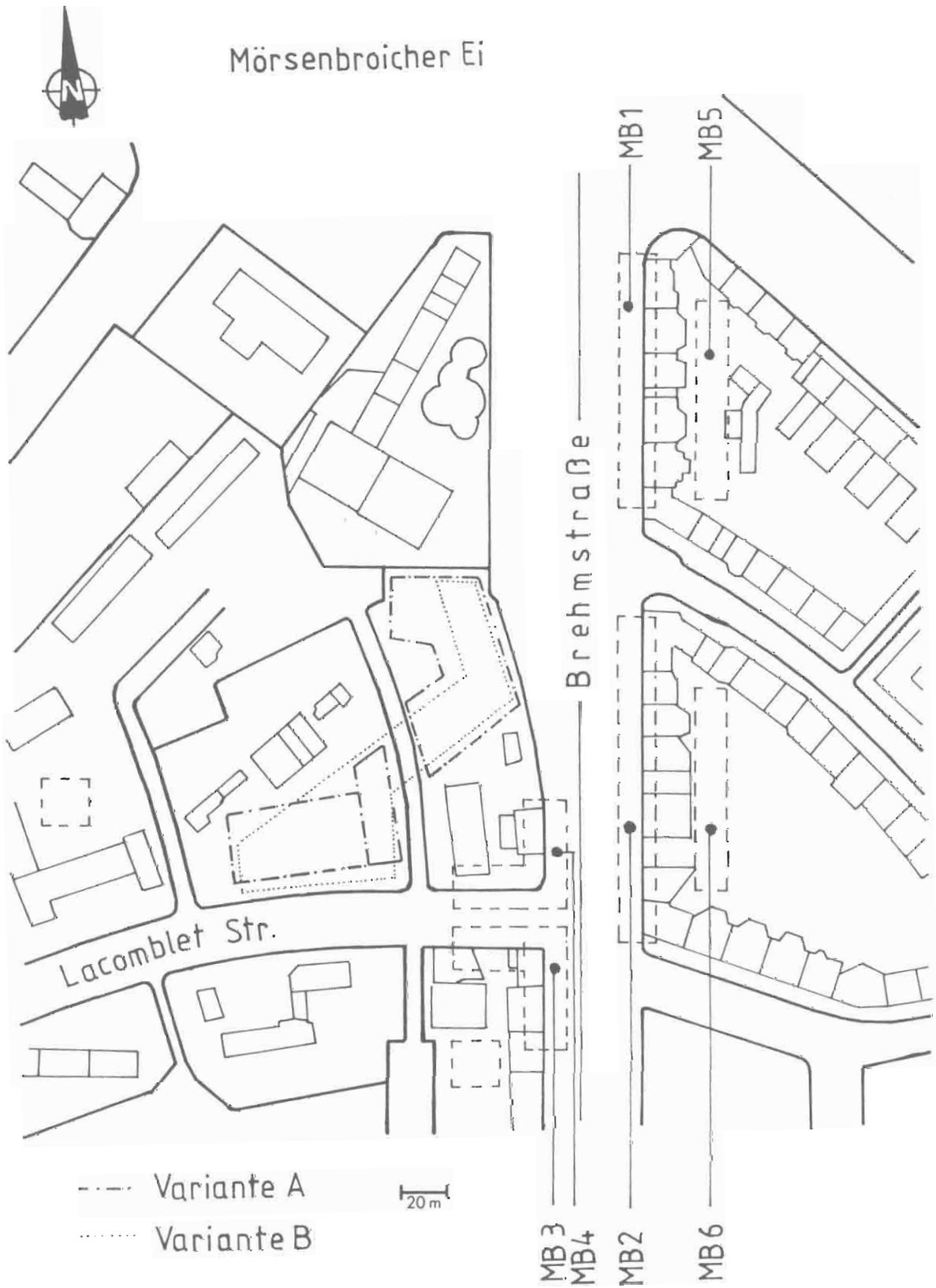


Abb. 3: Lage der Meßbereiche im Untersuchungsgebiet Düsseldorf-Mörsenbroich

Um die Ergebnisse der Immissionsprognose im sicheren Bereich anzusiedeln, wurden ausschließlich Fälle simuliert, bei denen Schwachwindwetterlagen mit Windgeschwindigkeiten von 1 m/s und gleichzeitig stärkstes Verkehrsaufkommen (Fahrmodus: Stau (FM 6) auf allen vier Fahrspuren) vorherrschten. Diese Entscheidung erfolgte vor dem Hintergrund, daß höhere Windgeschwindigkeiten die Schadstoffbelastung verringern (Gl. 5), und daß sich die CO-Abgasemissionsmenge auf dem zu untersuchenden Straßenstück bei höheren Fahrgeschwindigkeiten aufgrund der Abnahme der Fahrzeugdichte reduziert. Die Diskussion der Meßergebnisse hatte sich an den entsprechenden Richtwerten für die verschiedenen Spurenstoffkomponenten zu orientieren (vgl. Tab. 2). Die Bestimmung der Immissionskonzentrationen erfolgte an insgesamt 19 im Modell vorher festgelegten Meßpunkten, die aus Gründen der besseren Interpretierbarkeit anschließend zu acht Meßbereichen zusammengefaßt wurden. Aus der Vielzahl der vorliegenden Immissions- und Windmeßwerte soll exemplarisch nur auf das Verhalten der CO-Konzentrationen, und zwar für sechs als wichtig erachtete Meßbereiche, eingegangen werden.

Tab. 2: Zusammenstellung unterschiedlicher Grenzwerte für verschiedene Schadstoffkomponenten (nach LIS, 1987)

Kenngröße	Grenzwert ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Quelle
<u>Schwefeldioxid</u>		
Jahresmittel	140	TA-Luft
98 %-Wert (0,5 h)	400	TA-Luft
Median der Tagesmittel	120	EG-Richtlinie
98 %-Wert der Tagesmittel	350	EG-Richtlinie
Halbstundenwert	1000	VDI-2310
Tagesmittel	300	VDI-2310
<u>Stickstoffdioxid</u>		
Jahresmittel	80	TA-Luft
98 %-Wert (0,5 h)	300	TA-Luft (1983)
98 %-Wert (1,0 h)	200	EG-Richtlinie
Halbstundenwert	200	VDI-2310
Tagesmittel	100	VDI-2310
<u>Kohlenmonoxid</u>		
Jahresmittel	10.000	TA-Luft
98 %-Wert (0,5 h)	30.000	TA-Luft
Halbstundenwert	50.000	VDI-2310
Tagesmittel	10.000	VDI-2310
Jahresmittel	10.000	VDI-2310

Auf eine Beschreibung der Veränderung der Windgeschwindigkeit und der Turbulenzeigenschaften durch das Gebäude wird aus Platzgründen verzichtet. Für die Ergebnisdiskussion ist dieses ohnehin von geringerem Interesse, da über die Höhe der Immissionswerte indirekt auf die Ausbreitungsverhältnisse, die ja durch das Windfeld und die Turbulenz bestimmt werden, geschlossen werden kann. Folgende Standorte wurden für die Auswertung berücksichtigt (vgl. hierzu Abb. 3):

1. Straßenfront; Untere Brehmstraße (Ostseite)
2. Straßenfront; Obere Brehmstraße (Ostseite)
3. Eckfront Brehmstraße/Lacombletstraße
4. Straßenfront Brehmstraße (Westseite)
5. Hinterhofsituation zu Meßbereich 2 (Obere Brehmstraße; Ostseite)
6. Hinterhofsituation zu Meßbereich 1 (Untere Brehmstraße; Ostseite)

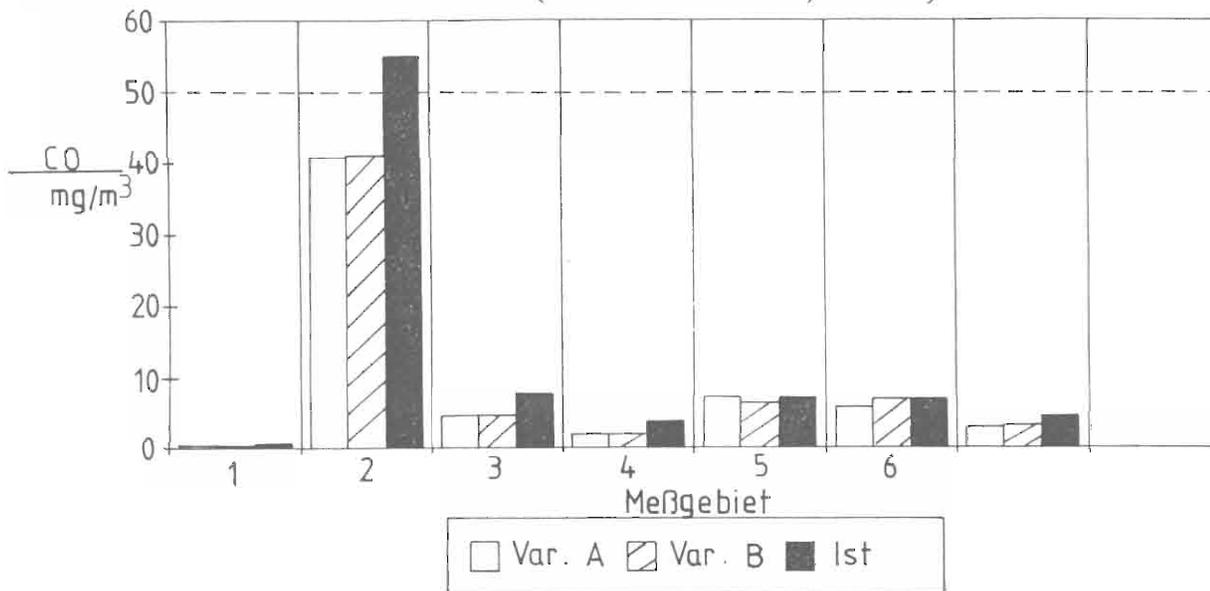


Abb. 4: Kfz-bedingte CO-Emission auf der Brehmstraße (Düsseldorf);
Windrichtung: NNE,
Windgeschwindigkeit = 1 m/s;
Verkehrsfluß: Stau

Für die Simulation der Windrichtung NNE, aus der - natürliche Verhältnisse zugrundegelegt - der Wind mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s während 430 Jahresstunden (= 4,9%) weht, ergaben sich an der Straßenfront obere Brehmstraße (Meßbereich 2) mit bis zu 55 mg/m³ CO relativ hohe Spitzenwerte (Abb. 4), die über dem Halbstunden-Richtwert für Kohlenmonoxid der VDI - Richtlinie von 50 mg/m³ lagen. Sowohl Gebäudevariante A als auch B wiesen gegenüber dem Ist-Zustand eine deutlich geringere Immissionssituation in der Brehmstraße auf. Nach Errichtung des geplanten Bürogebäudes ist somit von einer CO-Kurzzeitbelastung von etwa 40 mg/m³ auszugehen. Die Unterschiede zwischen beiden Gebäudevarianten sind bei dieser Anströmrichtung allerdings vernachlässigbar klein. An allen anderen Meßstandorten waren die CO-Konzentrationen im Vergleich zu Meßbereich 2 mit weniger als 10 mg/m³ deutlich niedriger. Wurde die Strömungsrichtung Südost [entsprechend 298 Jahresstunden (= 3,4 %) bei v = 1 m/s] eingestellt, so ergaben sich für die Bereiche der Häuserfronten der unteren und oberen Brehmstraße wie auch für das Eckhausgebiet (Meßbereiche 1 bis 4) generell höhere Spitzenbelastungen an CO (Abb. 5). In den Hinterhöfen (Meßbereiche 5 und 6) fielen die CO - Belastungen jedoch auf deutlich

niedrigere Werte ab. An der Kreuzung Brehmstraße/Lacombletstraße (Meßbereich 3) wurden CO - Werte für den unbebauten Istzustand von knapp 60 mg/m^3 nachgewiesen. Nach Einsatz einer der beiden Gebäudetypen erfolgte auch an diesem Standort eine erhebliche Reduktion der Schadstoffkonzentrationen. Für beide Gebäude wurden Immissionsminderungen von etwa 13 mg/m^3 erreicht, so daß sich für den bebauten Zustand Werte von weniger als 44 mg/m^3 einstellten. In Eckhausnähe (Meßbereich 4) traten dem Meßbereich 3 vergleichbar niedrige Werte auf, wobei es allerdings zu deutlichen Unterschieden zwischen beiden Gebäudevarianten kam: Variante A schnitt besser ab als Variante B. Ungünstigere Immissionskonzentrationen wurden für die Straßenfront untere und obere Brehmstraße an den Meßbereichen 1 und 2 nachgewiesen.

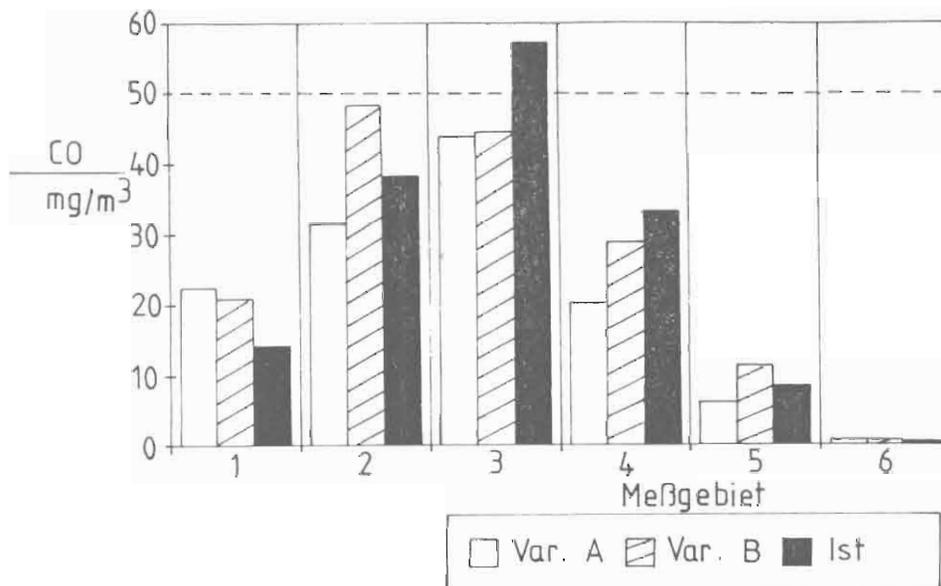


Abb. 5: Kfz-bedingte CO-Emission auf der Brehmstraße (Düsseldorf);
Windrichtung: SE,
Windgeschwindigkeit = 1 m/s;
Verkehrsfluß: Stau

Für die Windrichtung SSW [entsprechend 228 Jahresstunden (= 2,6 %) bei $v = 1 \text{ m/s}$] konnten für die Straßenfront obere Brehmstraße (Meßbereich 2), den Eckhausbereich (Meßbereich 3) und die Westseite der Brehmstraße (Meßbereich 4) Werte von mehr als 50 mg/m^3 nachgewiesen werden (Abb. 6). Der Hinterhof auf der unteren Brehmstraße (Meßbereich 6) wies mit knapp 10 mg/m^3 die geringsten Schadstoffkonzentrationen auf. Allein an der Straßenfront der oberen Brehmstraße (Meßbereich 2) stellte der Ist-Zustand die mit Abstand günstigste Immissionsituation dar. Sowohl Gebäudevariante A als auch B führten hier zu erheblichen Anstiegen der Schadstoffkonzentrationen. Die Werte nahmen um mehr als 10 mg/m^3 zu. Demgegenüber zeigte sich für die Eckfront Brehmstraße/Lacombletstraße (Meßbereiche 3 und 4) nach den durchgeführten Baumaßnahmen jeweils eine erhebliche Reduktion der Schadstoffkonzentrationen. In diesen beiden Fällen schnitt Variante B etwas günstiger ab. Da allerdings für die Meßbereiche 3 und 4 die Reduktion der Schadstoffe im Vergleich zum Istzustand erheblich war und im Falle des Meßbereichs 2 die Unterschiede zwischen Variante A und B nur sehr gering ausfielen,

ergaben sich für diesen Untersuchungsbereich leichte Vorteile für die Gebäudevariante B. Geringfügige Verschlechterungen der CO-Belastung an der unteren Brehmstraße und im Bereich des Hinterhofes der oberen Brehmstraße (Meßbereiche 1 und 5) durch die Gebäudevariante B hatten keine prägnanten Auswirkungen, da das Schadstoffkonzentrationsniveau insgesamt wesentlich niedriger lag als innerhalb der Meßbereiche 2 bis 4. Außerdem waren in diesem Gebiet die Unterschiede zwischen Ist-Zustand und Variante A bzw. B insgesamt gesehen nur gering ausgebildet.

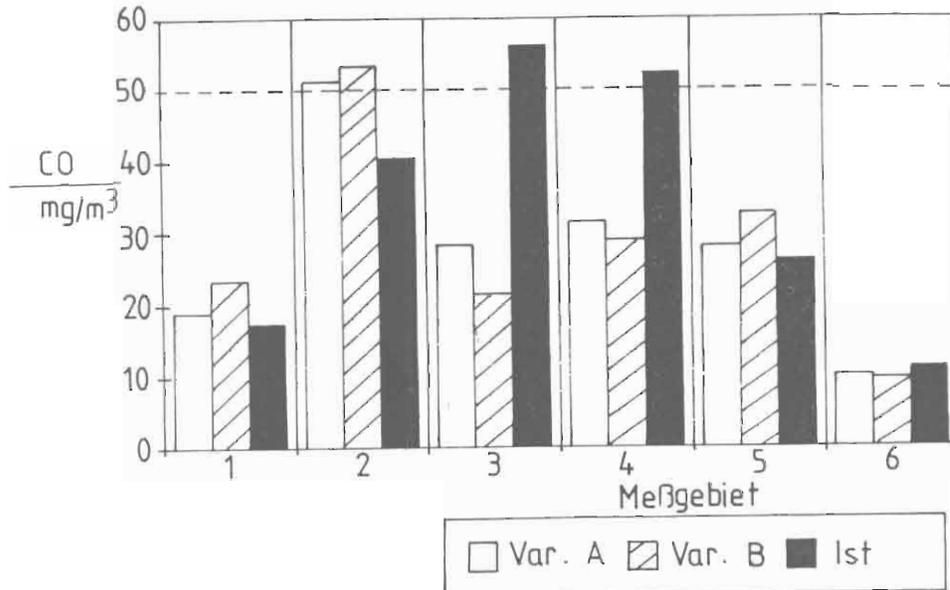


Abb. 6: Kfz-bedingte CO-Emission auf der Brehmstraße (Düsseldorf);
Windrichtung: SSW,
Windgeschwindigkeit = 1 m/s;
Verkehrsfluß: Stau

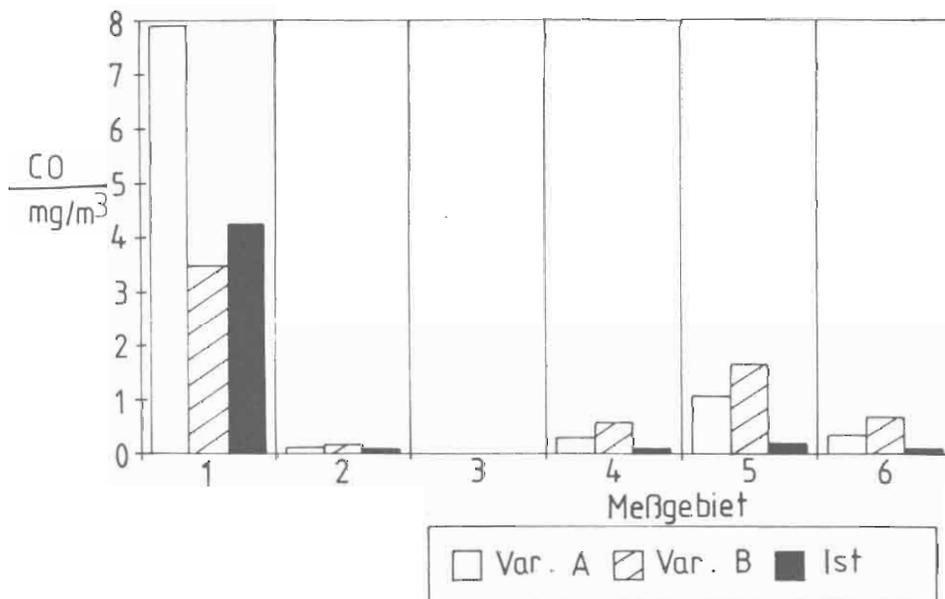


Abb. 7: Kfz-bedingte CO-Emission auf der Brehmstraße (Düsseldorf);
Windrichtung: W,
Windgeschwindigkeit = 1 m/s;
Verkehrsfluß: Stau

Abschließend wurden die Untersuchungen für die Windrichtung West [entsprechend 280 Jahresstunden (= 3,2 %) bei $v = 1$ m/s] durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen im Vergleich zu den anderen Windrichtungen ein außerordentlich niedriges absolutes Konzentrationsniveau von weniger als 5 mg/m^3 , bei gleichzeitig geringen relativen Unterschieden zwischen dem Ist- und Planungszustand sowie zwischen den Meßbereichen (Abb. 7). Auf eine Diskussion dieser Werte kann deshalb verzichtet werden.

4 Zusammenfassende Wertung der Windkanaluntersuchung

Anhand der durchgeführten Windkanaluntersuchung konnte festgestellt werden, mit welcher Immissionsbelastung nach Durchführung der Baumaßnahme im Untersuchungsgebiet zu rechnen ist.

Die Ergebnisse zeigten, daß mit Schließung der Baulücke nicht unbedingt eine Verschlechterung der Immissionssituation verbunden ist. Im Gegenteil, für einige Standorte konnte sogar nachgewiesen werden, daß es nach dem Bau des Bürohauses an vielen Stellen zu einer eindeutigen Verbesserung der Immissionssituation im bodennahen Bereich der Brehmstraße kommt.

Ursache für dieses zunächst nicht erwartete Ergebnis ist die Bildung zusätzlicher lokaler Turbulenzen durch das Gebäude, die für einen beschleunigten Abtransport der Schadstoffe sorgen und damit zu einer geringeren Immissionsbelastung - zumindest im Untersuchungsgebiet - führen. Es gibt allerdings auch Simulationsergebnisse, die höhere CO - Konzentrationen nach Einsatz einer Gebäudevariante zeigen. In solchen Fällen muß abgewogen werden, ob das entsprechende Gebiet, in dem die stärkere Belastung auftrat, aufgrund seiner Realnutzung höher oder niedriger zu bewerten ist als etwa derjenige Standort, an dem geringere Immissionskonzentrationen nachgewiesen wurden. Handelt es sich z.B. um eine Straßenfront, an der überwiegend Gewerbebetriebe angesiedelt sind, so wird man eine Verschlechterung der Immissionssituation nicht so negativ beurteilen als wenn dort Wohnbebauung vorherrscht.

Prinzipiell muß zu den vorliegenden Ergebnissen gesagt werden, daß sich ein Vergleich dieser Werte an der Immissionsgrundbelastung, die das Untersuchungsgebiet charakterisiert, orientieren sollte. Nach der Auswertung vorliegender Messungen des Temes - Meßnetzes (LIS 1987) belief sich der Jahresmittelwert für CO im Jahre 1985 auf $1,2 \text{ mg/m}^3$ mit höchsten Monatsmitteln im Winter bei 2 mg/m^3 und niedrigsten Monatsmitteln im Sommer bei weniger als 1 mg/m^3 . Die höchsten monatlichen Halbstundenmittelwerte erreichten in den Wintermonaten 12 bis 16 mg/m^3 , in den Sommermonaten hingegen Konzentrationen, die zwischen 2 und 6 mg/m^3 lagen. Im Vergleich zur Grundbelastung sind die im Modell gemessenen Werte auf einem deutlich höheren Niveau angesiedelt. Es ist allerdings bei den Modellsimulationen zu berücksichtigen, daß ausnahmslos Spitzenwerte gemessen wurden, die in der Realität in nur wenigen Ausnahmefällen kurzfristig eintreten. Die für die Untersuchung zugrundegelegten Schwachwindwetterlagen sind zudem relativ selten und wurden darüber hinaus hier mit Verkehrsstau - mithin stärkster Kfz-Emission - kombiniert. Die Simulierung hoher Belastungssituationen wurde gewählt, um eine größtmögliche Sicherheit beim Vergleich mit Richtwerten zu erreichen.

Während sich in den meisten Fällen klare Unterschiede in der Immissionsbelastung zwischen Ist- und Planungszustand zeigten, fielen die Ergebnisse für oder gegen eine bestimmte Gebäudevariante weniger eindeutig aus. Die Ursache ist darin zu suchen, daß das Immissionskonzentrationsfeld nicht so sehr durch die Gebäudeform als vielmehr durch das bloße Vorhandensein eines Gebäudes, das eine Baulücke schließt, beeinflußt wird. Unter Berücksichtigung aller, auch der hier nicht dargelegten Fälle, ließen sich für Gebäudevariante B leichte Vorteile ermitteln. Mit dem Bau des Bürohauses wurde nach Vorliegen der Untersuchung begonnen.

Windkanaluntersuchungen - und das bestätigen die hier dargestellten Ergebnisse in Übereinstimmung mit den in der Literatur beschriebenen Fällen - stellen im Rahmen stadtklimatischer Untersuchungen und Abwägungsprozesse ein wichtiges Hilfsmittel dar, um Aussagen zur Immissionsklimatologie des urban-industriellen Raumes vornehmen zu können.

Literaturverzeichnis

- Ahrens, G.A. (1988): Berücksichtigung der Belange des Stadtklimas und der Luftreinhaltung im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP). - In: Raumforschung und Raumordnung 46, H. 4, S. 182 - 183.
- Bangert, H., W. Kuttler und M. Grauthoff (1988): Klimaanalyse Stadt Wuppertal. Der Oberstadtdirektor der Stadt Wuppertal.
- Barlag, A.-B., W. Kuttler und P. Stock (1989): Klimaanalyse Stadt Bottrop. Kommunalverband Ruhrgebiet, Essen, Planungshefte Ruhrgebiet, P O 23.
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) (1985): Belastungsgebiet Regensburg; Emissionskataster, Immissionskataster, Dezember 1985.
- Beckröge, W., O. Kiese, G. Otto und P. Stock (o.J.): Klimaanalyse Stadt Recklinghausen. Kommunalverband Ruhrgebiet, Essen, Abt. Kartographie, Luftbildwesen und Stadtklimatologie.
- Beckröge, W. (1989): Ökologische Wechselbeziehungen zwischen Stadtgrün und Bioklima, Stadtklimabewertung. - In: Kuttler, W. (Hrsg.) (1989): Verhandl. Ges. f. Ökologie, Essen 1988, Bd. XVIII, S. 139 - 148.
- Brilon, W., H. J. Niemann und E. Romberg (1987): Windkanaluntersuchungen zur Ausbreitung von Abgasen an Autobahnen. - In: Straßenverkehrstechnik 31, Nr. 4, S. 122 - 133.
- Clarke, J. F. (1969): Nocturnal urban boundary layer over Cincinnati, Ohio. - In: Mon. Weath. Rev. 97, S. 582-589.
- Havlik, D. und P. Stock (o. J.): Klimaanalyse Stadt Moers. Kommunalverband Ruhrgebiet, Essen, Abt. Karten-, Luftbildwesen und Stadtklimatologie.
- Horbert, M., A. Kirchgeorg und A. v. Stülpnagel (1983): Ergebnisse stadtklimatischer Untersuchungen als Beitrag zur Freiraumplanung. Umweltforschungsplan des Bundesministers des Innern - Ökologie -, Umweltbundesamt, Texte 18/83.
- Horbert, M., A. Kirchgeorg und A. v. Stülpnagel (1986): Klimaforschung in Ballungsgebieten. Dargestellt am Beispiel Berlin. - In: Geographische Rundschau 38, H. 2, S. 71 - 80.
- Jendritzky, G., Soenning, W. und H. - J. Swantes (1979): Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung, Akademie für Raumordnung und Landesplanung, Beiträge 28.
- Kaminske, V. (1984): Bioklimatisch orientierte Stadtplanung und der Nutzwert einzelner Maßnahmen. Das Beispiel der Stadt Karlsruhe.- In: Raumforschung und Raumordnung 42, H. 4-5, S. 200 - 208.

- Kirchhofer, W., A. Ohmura und H. Wanner (eds.) (1984): Applied Climatology, 25 th Geographical Congress. = Zürcher Geographische Schriften, No. 18., Bd. 14.
- Kuttler, W. (1984): Stadtklimatologische Untersuchungen in Lünen. - In: Kuttler, W. und D. Schreiber (1984): Stadt- und geländeklimatische Untersuchungen im südlichen Münsterland. = Materialien zur Raumordnung, Geogr. Inst. Ruhr-Univ. Bochum, Bd. XXV, S. 15 -76.
- Kuttler, W. (1985): Applied Climatology in the Federal Republic of Germany since 1970. - In: Klink, H.-J. and H. Liedtke (eds.): Physical Geography in the Federal Republic of Germany. = Bochumer Geographische Arbeiten, Heft 44, S. 20 - 30.
- Kuttler, W. (1988): Spatial and temporal structures of the urban climate - a survey.- In: Grefen, K. u. J. Löbel (eds.) (1988): Environmental Meteorology; Proc. Intern. Symp. Würzburg, 29. Sept. - 1. Oct. 1987; pp. 305-334.
- Lahmann, E. (1990): Luftverunreinigung - Luftreinhaltung. Eine Einführung in ein interdisziplinäres Wissensgebiet, 201 S., Parey Verlag, Berlin.
- Leisen, P. (1978): Windkanaluntersuchungen zur Simulation von Immissions-situationen in verkehrsreichen Straßenschluchten. Kolloquiumsbericht Abgasimmissionsbelastungen durch den Kraftfahrzeugverkehr, TÜV Rheinland 1978, S. 223-249.
- LIS (= Landesanstalt für Immissionsschutz) (Hrsg.) (1987): Temes Jahresbericht 1985. Berichte über die Luftqualität in Nordrhein-Westfalen.
- Lohmeyer, A. (1984): Simulierung von Ausbreitungsvorgängen im Windkanal.- In: Staub-Reinhaltung der Luft 44, Nr. 5, S. 244-249
- Oke, T. R. (1984): Towards a Prescription for the Greater Use of Climatic Principles in Settlement Planning.- In: Energy and Buildings, 7, S. 1 -10.
- Plate, E. J. (1982): Windkanalmodellierung von Ausbreitungsvorgängen in Stadtgebieten. - In: Kolloquiumsbericht Abgasbelastungen durch den Kraftfahrzeugverkehr. TÜV Rheinland, S. 61-83.
- Schatzmann, M., G. König und A. Lohmeyer (1986): Physikalische Modellierung mikrometeorologischer Vorgänge im Windkanal. - In: Meteorologische Rundschau, 39, S. 44 - 59.
- Schreiber, D. (1984): Stadtklimatologische Untersuchungen in Recklinghausen.- In: Kuttler, W. und D. Schreiber (Hrsg.) (1984): Stadt- und geländeklimatische Untersuchungen im südlichen Münsterland. Materialien zur Raumordnung, Geogr. Institut Ruhr-Universität Bochum, Bd. XXV, S. 77 - 102.
- Stock, P. und W. Beckröge (1983): Synthetische Klimafunktionskarten für das Ruhrgebiet. - In: Annalen der Meteorologie (N.F.) 20, Offenbach, S. 57 - 59.
- Stock, P., W. Beckröge, O. Kiese, W. Kuttler und H. Lüftner (1986): Klimaanalyse Stadt Dortmund. Kommunalverband Ruhrgebiet, Essen, Planungshefte Ruhrgebiet, P 0 18.
- Wanner, H. (1986): Die Grundstrukturen der städtischen Klimamodifikation und deren Bedeutung für die Raumplanung. - In: Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft von Bern, Bd. 55, S. 67 - 84.
- Weischet, W. (1979): Problematisches über die städtische Wärmeinsel und die Notwendigkeit einer Baukörperklimatologie. - In: Siedlungsgeographische Studien, S. 407-423.
- Weischet, W. (1980): Stadtklimatologie und Stadtplanung. - In: (o. Hrsg.) (1980): Klima und Planung. 79. Tagung am Geographischen Institut der Universität Bern, vom 19.-20.9.1979. Schweizerische Naturforschende Gesellschaft, Bd. 6, S. 73-95.
- Weischet, W., W. Nübler u. A. Gehrke (1977): Der Einfluß von Baukörperstrukturen auf das Stadtklima am Beispiel von Freiburg/Br. - In: Franke, E. (Hrsg.) (1977): Stadtklima: Ergebnisse und Aspekte für die Stadtplanung.