

Ermittlung der Abgasbelastungen durch den Straßenverkehr



Rudolf PISCHINGER, Dipl.-Ing., Dr. techn., o. Univ.-Prof., Vorstand des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz Jahrgang 1935, Studium des Maschinenbaues an der Technischen Universität Graz, anschließend Universitätsassistent am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Promotion und Habilitation über Fragen der Verbrennung im Motor. Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der AVL. Seit 1970 Universitätsprofessor an der Technischen Universität Graz, 1977 — 1979 Dekan der Fakultät für Maschinenbau.

Die Abgasbelastung durch den Straßenverkehr ergibt sich aus einem komplexen Mechanismus, in dem das Fahrzeug, der Verkehr und die Schadstoffausbreitung wesentliche Glieder sind. Die Abgasemissionen werden nicht nur durch die von den Abgasgesetzen festgelegten Grenzwerte bestimmt, sondern auch von der vom Fahrer gewählten oder vom Verkehr aufgezwungenen Fahrweise. Die Schadstoffe breiten sich abhängig von den meteorologischen Bedingungen in der Atmosphäre aus und gelangen so mehr oder weniger verdünnt in die Umgebung. Dadurch werden fallweise Grenzwerte überschritten, die von den Hygienikern festzulegen sind. Die Untersuchung dieser Vorgänge und die Minimierung der Abgasbelastung erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Fachleute.

1. Einleitung

Die Abgas- und Lärmbelastung durch den Straßenverkehr hat vor allem in den Ballungszentren ein Ausmaß angenommen, das dringende Maßnahmen erforderlich macht. Ohne die Bedeutung der Lärmbelastung einschränken zu wollen, soll sich der vorliegende Beitrag auf die Abgase beschränken.

Die tatsächliche Belastung der Menschen, Tiere und Pflanzen wird von verschiedenen Faktoren bestimmt (Abb. 1).

Die Emissionen des Einzelfahrzeuges werden durch seine Konstruktion (Motor, Getriebe, Gewicht, Widerstände usw.), aber auch durch die Fahrweise bestimmt, welche wieder vom Verkehr beeinflusst wird. Der Verkehr bestimmt andererseits die Zahl der Fahrzeuge und damit die Gesamtemission eines bestimmten Straßenabschnittes.

Durch die vom Verkehr angefachten Turbulenzen und durch die meteorologischen Vorgänge breiten sich die Schadstoffe in der Atmosphäre aus, wobei die räumliche Situation der Straße eine entscheidende Rolle spielt. Daraus ergeben sich die Belastungen an den einzelnen Punkten, und es ist von den Hygienikern zu entscheiden,

ob die Belastungen unbedenklich, bedenklich oder unmittelbar gefährdend sind.

Es handelt sich also um ein sehr komplexes System, das eine Zusammenarbeit der Fachleute aus den verschiedenen Disziplinen (Fahrzeugtechniker, Verkehrsplaner, Ausbreitungsfachleute, Städteplaner und Mediziner) erforderlich macht [1].

2. Emittierte Schadstoffe

Die Abgase von Verbrennungsmotoren bestehen zum überwiegenden Teil aus Stickstoff (N_2), Kohlendioxid (CO_2), Wasserdampf (H_2O) und gegebenenfalls Sauerstoff (O_2), welche weitgehend ungiftig sind. Daneben enthalten sie eine Reihe von schädlichen Stoffen, welche sich in drei Kategorien einteilen lassen:

1) Produkte der unvollständigen Verbrennung

Diese entstehen durch allgemeinen örtlichen Luftmangel im Brennraum oder durch schlechte Verbrennungsbedingungen (z.B. zu niedrige Temperaturen).

Zu dieser Stoffgruppe gehören:

— Kohlenmonoxid (CO): CO ist ein Atemgift.

— Kohlenwasserstoffe (HC): Es wer-

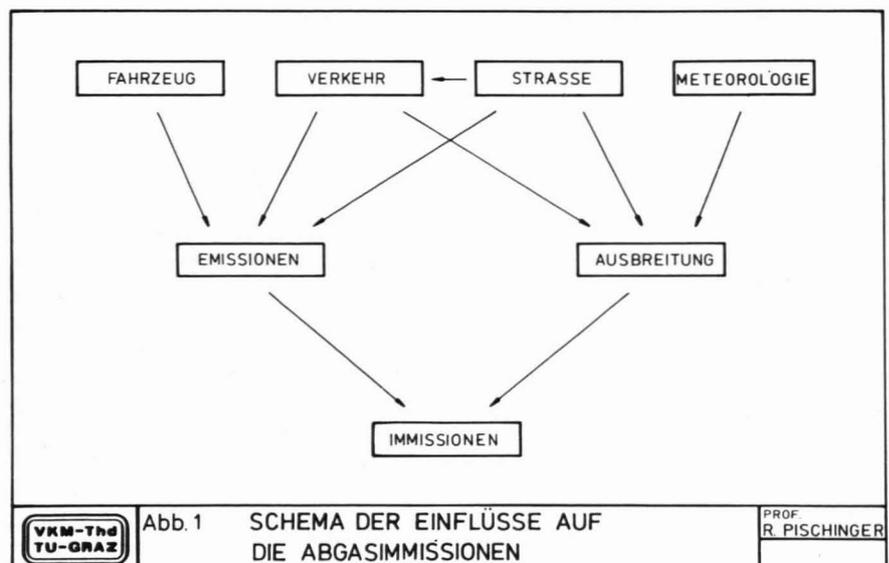


Abb. 1 SCHEMA DER EINFLÜSSE AUF DIE ABGASIMMISSIONEN

PROF. R. PISCHINGER

Abb. 1: Schema der Einflüsse auf die Abgasemission



den über tausend verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen mit sehr unterschiedlicher Giftigkeit im Abgas von Verbrennungsmotoren nachgewiesen. Unter diesen befinden sich auch Krebserreger und starke Geruchs- und Reizstoffe.

— Ruß: Er besteht aus festen Kohlenstoffpartikeln, an die Kohlenwasserstoffe angelagert sind.

2) Produkte der »überevullständigen« Verbrennung

Bei sehr hohen Temperaturen und Anwesenheit von Sauerstoff oxidiert der Stickstoff der Luft zu Stickoxiden. Dabei entsteht im Motor vor allem:

— Stickstoffmonoxid (NO). Dieses ist ein Atemgift und reagiert in der Atmosphäre zu

— Stickstoffdioxid (NO₂), welches ein Atem- und Reizgift und noch giftiger als das NO ist.

Beide Stoffe (und eventuelle weitere Stickstoff-Sauerstoffverbindungen) werden als **Stickoxide** NO_x zusammengefaßt, wobei die physikalischen und toxischen Eigenschaften von NO₂ zugrunde gelegt werden.

3) Produkte aus Additiven und Verunreinigungen

— Blei: Bleiverbindungen werden als Klopfbremse den Kraftstoffen für Ottomotoren beigegeben. Bei der Verbrennung oxidieren sie und gelangen in Form von Festkörperpartikeln in die Atmosphäre. Von dort gelangt es entweder direkt über die Lunge oder über die Nahrungskette in den menschlichen Körper, wo es als Langzeitgift wirksam wird.

— Schwefeldioxid (SO₂): Der im Kraftstoff enthaltene Schwefel oxidiert zu SO₂. Da der Schwefelgehalt des Kraftstoffes schon aus betrieblichen Gründen niedrig sein muß, ist die SO₂-Emission von Kraftfahrzeugen vergleichsweise niedrig.

Diese Schadstoffe werden von den einzelnen Motortypen und bei verschiedenen Lastzuständen in sehr unterschiedlicher Menge ausgestoßen.

3. Abgasgesetzgebung

Eine sinnvolle Abgasgesetzgebung muß die im Straßenverkehr gefahrenen Betriebszustände möglichst wirklichkeitsnahe erfassen. Zu diesem Zweck wurden auf Grund statistischer Untersuchungen in Europa, USA und Japan

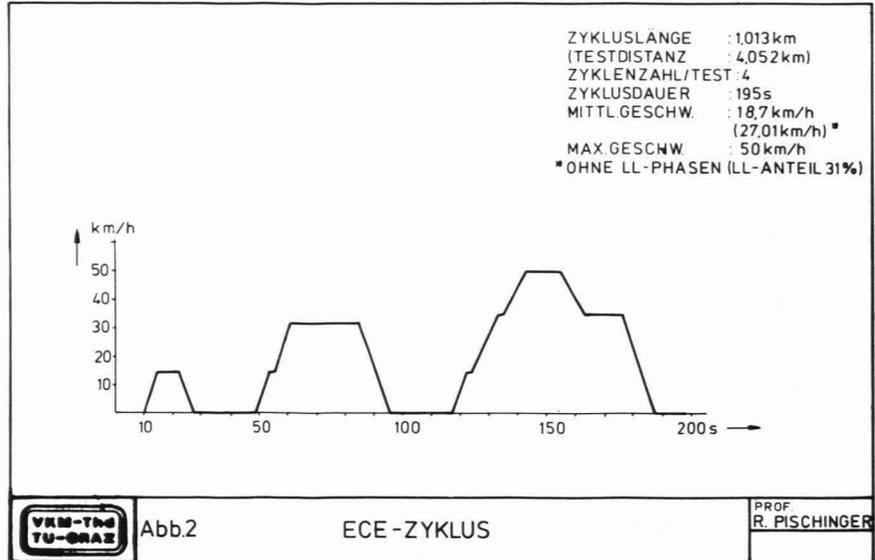


Abb. 2: ECE (Europa)-Zyklus

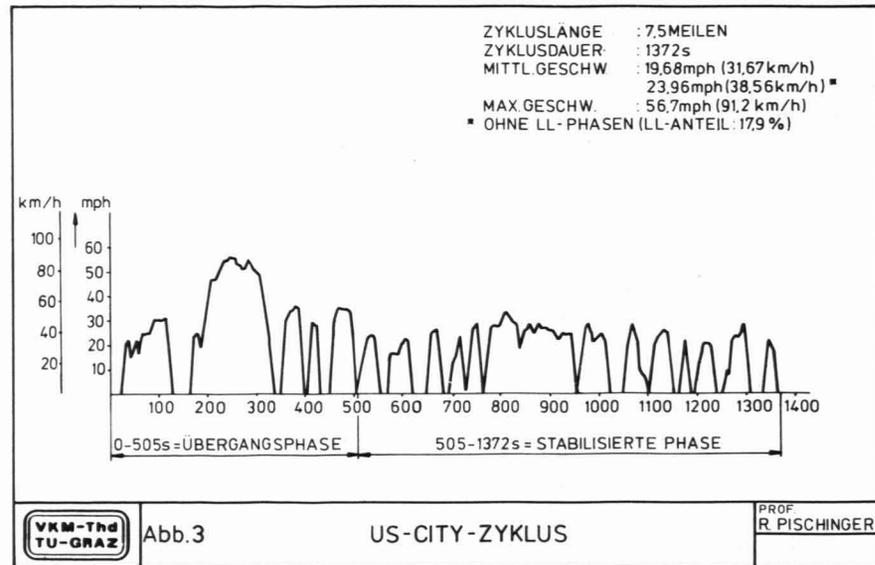


Abb. 3: US-City-Zyklus

unterschiedliche Fahrzyklen festgelegt, welche am Fahrprüfstand zu durchfahren sind.

Abb. 2 zeigt den in Europa geltenden ECE-Zyklus und Abb. 3 den in USA geltenden FTP-Zyklus. Die Grenzwerte sind in Europa nach Fahrzeuggewicht gestaffelt. Tab. 1 zeigt die Typengrenzwerte für USA, Japan und Europa. Alle Werte werden auf g/km umgerechnet, um sie vergleichen zu können. Ein Vergleich ist aber trotzdem problematisch, weil nicht nur unterschiedliche Fahrzyklen, sondern zum Teil auch unterschiedliche Meßverfahren verwendet werden. Das kommt vor allem in den extremen unterschiedlichen Grenzwerten in Japan für den Heißtest und Kalttest zum Ausdruck.

	USA	Japan		Europa*
	g/km	Heißtest g/km	Kalttest g/km	g/km
CO	4,35	2,1	14,7	14,5
HC	0,25	0,25	1,71	4,75
NO _x	0,44	0,25	1,08	4,75

* Typenprüfung, Bezugsgewicht = 1020 kg

Tab. 1: Abgasgrenzwerte in USA, Japan und Europa

4. Emissionen im Straßenverkehr

Die Emissionen im Straßenverkehr können von den in der Abgasgesetzgebung festgelegten Grenzwerten abweichen, weil die tatsächlich gefahrenen Fahrzyklen sich von den Testzyklen erheblich unterscheiden können und weil sich außerdem das Emissionsverhalten der Fahrzeuge während des Betriebes ändert.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen und die Aufstellung von Emissionskatastern zu ermöglichen, wurde beim TÜV Rheinland folgendes Verfahren entwickelt [2]: Es wurden einfache trapezförmige Fahrzyklen entsprechend Abb. 4 festgelegt. Jeder Fahrzyklus repräsentiert eine bestimmte mittlere Fahrgeschwindigkeit. Anhand von Reihenuntersuchungen an in Betrieb befindlichen Fahrzeugen wurden die mittleren Emissionen der einzelnen Fahrzyklen bestimmt. Die Meßergebnisse wurden laufend fortgeschrieben [3]. Für die Erstellung von Emissionskatastern wird aus der Verkehrsdichte und der Straßentypen auf die mittlere Fahrgeschwindigkeit und daraus auf die Emissionen geschlossen.

Dieses Verfahren hat sich bei der Erstellung von großräumigen Emissionskatastern sehr bewährt. Es versagt aber dort, wo auf Grund besonderer Gegebenheiten die Fahrweise erheblich von den Trapezzyklen abweicht oder wenn verkehrstechnische Maßnahmen, die die Fahrweise gezielt beeinflussen, untersucht und bewertet werden sollen.

Zur Behandlung dieser Fragen wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz eine »Digitalisiertes Grazer Verfahren (DGV)« genannte Methode entwickelt [4] [5], bei der der Geschwindigkeitsverlauf in Zeitelemente zerlegt wird (Abb. 5), welche durch Geschwindigkeit und Beschleunigung gekennzeichnet sind. Durch Reihenuntersuchungen an in Betrieb befindlichen Fahrzeugen wurden die Abgasemissionen als Funktion von Geschwindigkeit und Beschleunigung ermittelt. Der Geschwindigkeitsverlauf kann bei bestehenden Straßennetzen durch ein im Verkehr mit schwimmendes Fahrzeug gemessen werden. Für diesen Zweck wurde am Institut ein Präzisionsmeßrad ent-

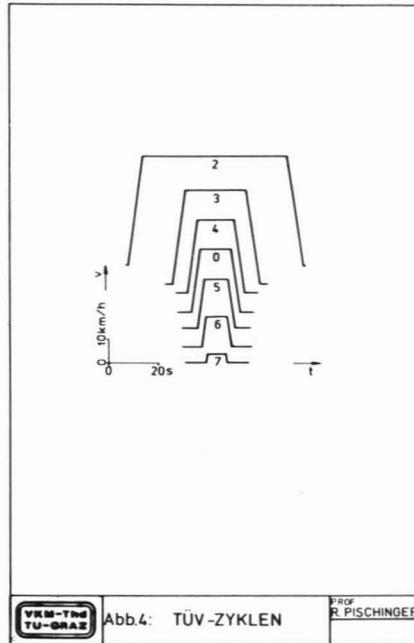


Abb. 4: TÜV-Zyklen zur Ermittlung der Pkw-Emissionen

wickelt [6] (Abb. 6). Für die Beurteilung von Straßen im Planungsstadium muß der Geschwindigkeitsverlauf mittels verkehrstechnischer Rechenverfahren (z.B. [7]) ermittelt werden.

Mit Hilfe des DGV wurden auch die Emissionen der TÜV-Zyklen nachgerechnet. Abb. 7 zeigt einen Vergleich der Rechenergebnisse mit den vom TÜV gemessenen Emissionswerten. Das DGV kann aber auch dazu benützt werden, um die Emissionen verschiedener Testzyklen zu vergleichen. Aus den in Tab. 2 wiedergegebenen Resultaten ersieht man den entscheidenden Einfluß des Testzyklus und die Problematik eines Vergleiches zwischen amerikanischen und europäischen Grenzwerten.

»Eine sinnvolle Abgasgesetzgebung muß die im Stadtverkehr gefahrenen Betriebszustände möglichst wirklichkeitsnahe erfassen.«

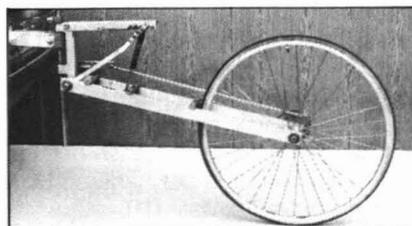


Abb. 6: Meßrad

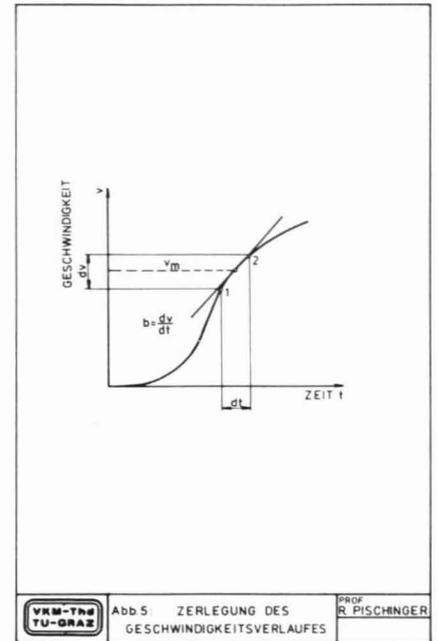


Abb. 5: Zerlegung des Geschwindigkeitsverlaufes in Zeitintervalle.

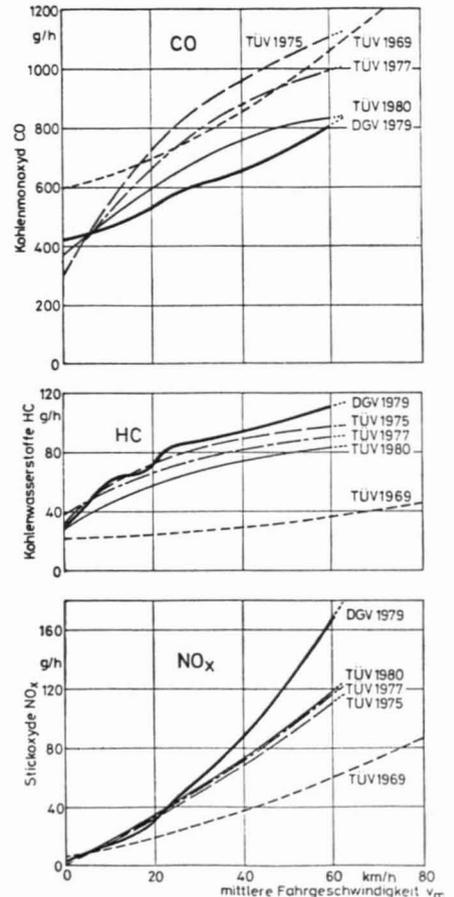


Abb. 7: Vergleich der rechnerischen Simulation der TÜV-Zyklen mit den Messungen

	V_m km/h	Verbrauch 1/100 km	HC g/km	CO g/km	NO _x g/km
ECE-Zyklus	18,7	11,37	4,38	27,49	1,77
VW-Zyklus	29,7	9,25	3,52	20,79	2,49
CVS-Zyklus	31,5	8,77	3,06	19,14	2,15

Tab. 2: Vergleich verschiedener Testzyklen (mit DGV berechnete Werte des betriebswarmen Motors)

5. Schadstoffausbreitung (Transmission)

Die Schadstoffbelastung durch den Straßenverkehr ist weniger ein großräumiges Problem, sondern vor allem eine Frage der lokalen Belastung in der Umgebung von Straßen. Es ist daher sehr wichtig, die Ausbreitung der Abgase in der Atmosphäre zu kennen. Diese wird vor allem durch die meteorologischen Vorgänge in der Atmosphäre, aber in unmittelbarer Straßennähe auch durch die durch die Fahrzeuge angeregte Turbulenz bestimmt. Die Vorgänge sind dabei so kompliziert, daß hier nur ein Überblick gegeben werden kann.

Die gasförmigen Schadstoffe breiten sich in der Atmosphäre nur durch die turbulenten Strömungsvorgänge aus, ohne daß die Dichteunterschiede eine merkliche Rolle spielen. Bei bestimmten Schadstoffen tritt dabei allerdings eine chemische Umwandlung ein. Das gilt vor allem für NO, das langsam zu NO₂ oxidiert. Schwebestoffe, z.B. Blei, Ruß und vor allem Staub setzen sich dagegen, abhängig von der Partikelgröße, langsam ab.

Messungen in der Natur sind wegen der statistischen Natur der Emissionen einerseits und der Meteorologie andererseits sehr zeit- und kostenaufwendig und außerdem schwer zu interpretieren. Es besteht daher der dringende Bedarf nach Rechenmodellen, welche die Immissionen nicht nur an bestehenden, sondern auch an geplanten Straßen ermitteln können.

Einfache Rechenmodelle für die Schadstoffausbreitung von einer

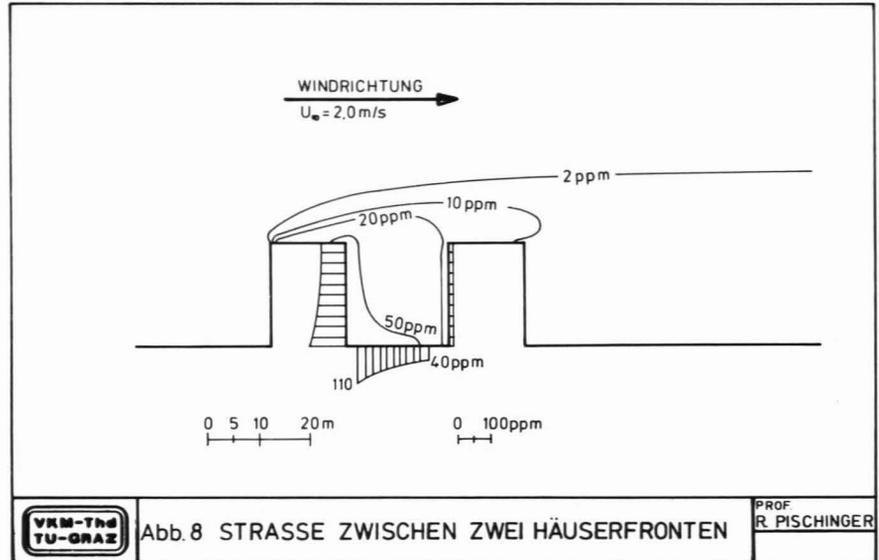


Abb. 8: Schadstoffausbreitung bei einer Straße zwischen zwei Häuserfronten

Punkt- oder Linienquelle in der Ebene verwenden die statistische Methode mit einer Gaußverteilung (siehe z.B. [8]). Diese ist z.B. auch dem »Merkblatt für die Luftverunreinigung an Straßen« [9] zugrunde gelegt, welches in der BRD zur Beurteilung der Schadstoffimmissionen an unverbauten Straßen herangezogen wurde. Bei den kritischen Situationen handelt es sich aber fast immer um verbautes Gebiet, bei dem dieses einfache Ausbreitungsmodell versagt. In diesem Fall sind komplizierte Ausbreitungsmodelle anzuwenden, welche aufwendige numerische Lösungsmethoden erfordern.

»Optimale Abgasentgiftung kann nur durch aufeinander abgestimmte, interdisziplinäre Zusammenarbeit der Fachleute bewältigt werden.«

Aussichtsreiche Modelle arbeiten nach dem k, ϵ -Modell, bei dem die Turbulenz durch die kinetische Energie (k) und die Dissipation (ϵ) beschrieben wird. Damit konnten in zweidimensionalen Fällen (unendlich lange Straße im Einschnitt, Häuserschlucht, usw.) gute Resultate erzielt werden [10]. Abb. 8 zeigt ein Beispiel einer solchen Berechnung. Allgemeine räumliche Ausbreitungsmodelle sind allerdings sehr kompliziert und rechenintensiv und liefern vorläufig nur in der näheren Umgebung gute Resultate [11]. Man ist deshalb gezwungen, bei komplizierten räumlichen Ausbreitungsbe-

dingungen Modellversuche zu machen [12]. Die Emissionen werden dabei durch Impfen mit einem Gas (z.B. Propan) simuliert und das Konzentrationsfeld in der Umgebung der Straße ausgemessen (Abb. 9).

Immissionen und Immissionsgrenzwerte

Aus den Abgasemissionen und der Ausbreitung in der Atmosphäre (Transmission) können die Immissionen ermittelt werden. Diese dürfen bestimmte, von den Hygienikern festzulegende Grenzwerte nicht überschreiten. Da die Dauer der Einwirkung von entscheidender Bedeutung ist, müssen auch die Grenzwerte davon abhängig gemacht werden. Tab. 3 gibt die Grenzwerte der in der BRD gültigen T.A. Luft an, welche auch von Österreich übernommen wurden [13]. Grenzwerte für Kohlenwasserstoffe und Ruß gibt es derzeit noch nicht. Ebenso ist die kumulative Wirkung mehrerer Schadstoffe weitgehend ungeklärt.

Die Beurteilung der gesundheitlichen Belastung durch die verschiedenen Schadstoffe ist daher sehr schwierig. Trotzdem sollte zur Vereinfachung der Diskussion eine einzige Zahl eingeführt werden, welche die durchschnittliche Belastung durch alle Schadstoffe angibt und zumindest ein relatives Maß darstellen kann. Eine Diskussion über die Definition dieser Zahl wäre dringend notwendig.

Schadstoff	Langzeiteinwirkung (entspr. Jahresmittelwert) mg/m ³	Kurzzeiteinwirkung (entspr. 95 Perzentil) mg/m ³
Kohlenmonoxyd	10	30
Stickstoffmonoxyd	0,20	0,60
Stickstoffdioxid	0,10	0,30
Blei (nach VDI 2310)	0,003	0,0015

Tab. 3: Immissionsgrenzwerte nach T. A. Luft bzw. /13/

Schluß

Die Belastung der Menschen und der Umwelt durch die Abgase des Straßenverkehrs ergibt sich aus einem komplexen Mechanismus, in dem das Fahrzeug, der Verkehr und die Schadstoffausbreitung wesentliche Glieder sind. Zur Optimierung dieses Systems müssen die einzelnen Vorgänge möglichst gut bekannt sein und die Maßnahmen durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Fachleute aufeinander abgestimmt werden. Nur auf diese Weise können die in die Abgasentgiftung, den Straßenbau und den Wohnbau investierten Mittel optimal zum Wohle des Menschen eingesetzt werden.



Literatur:

- [1] Abgasbelastungen durch den Kraftfahrzeugverkehr. Kolloquiumsbericht. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1982.
- [2] May, H., PLASSMANN, E.: Abgasemissionen von Kraftfahrzeugen in Großstädten und industriellen Ballungsgebieten. TÜV Rheinland, Köln 1973.
- [3] Das Emissionsverhalten von Personenkraftwagen in der Bundesrepublik Deutschland. Umweltbundesamt, Bericht 9/80.
- [4] HAGHOFER, H.: Das digitalisierte Grazer Verfahren. TU Graz, Mitteilungen des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Heft 34, 1982.
- [5] PISCHINGER, R., HAGHOFER, H.: Eine Methode zur Berechnung des Kraftstoffverbrauches und der Schadstoffemission von Kraftfahrzeugen aus dem Geschwindigkeitsverlauf. XX. FISITA-Kongreß, Nr. 845114, Wien 1984.
- [6] STASKA, G.: Bestimmung der Fahrwiderstände im Fahrversuch. ATZ 86 (1984), Seite 175—180.

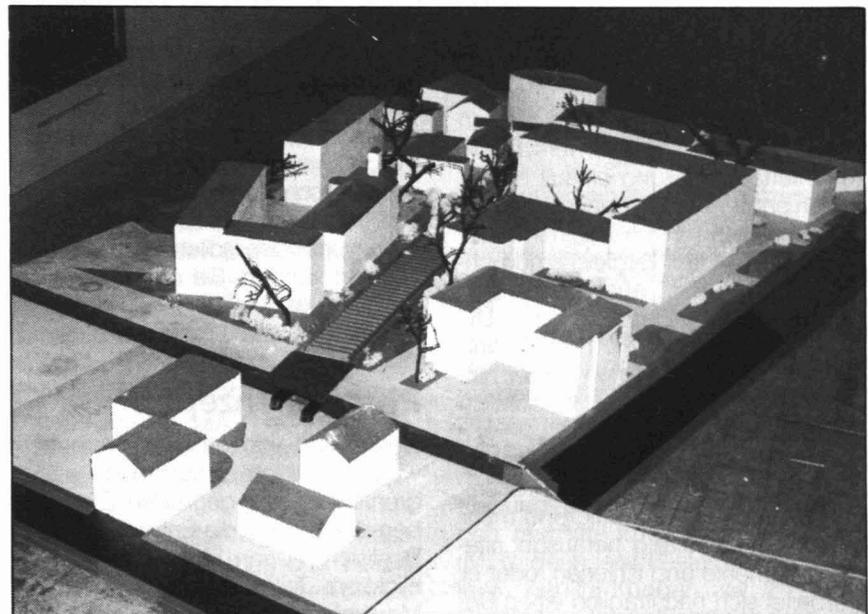
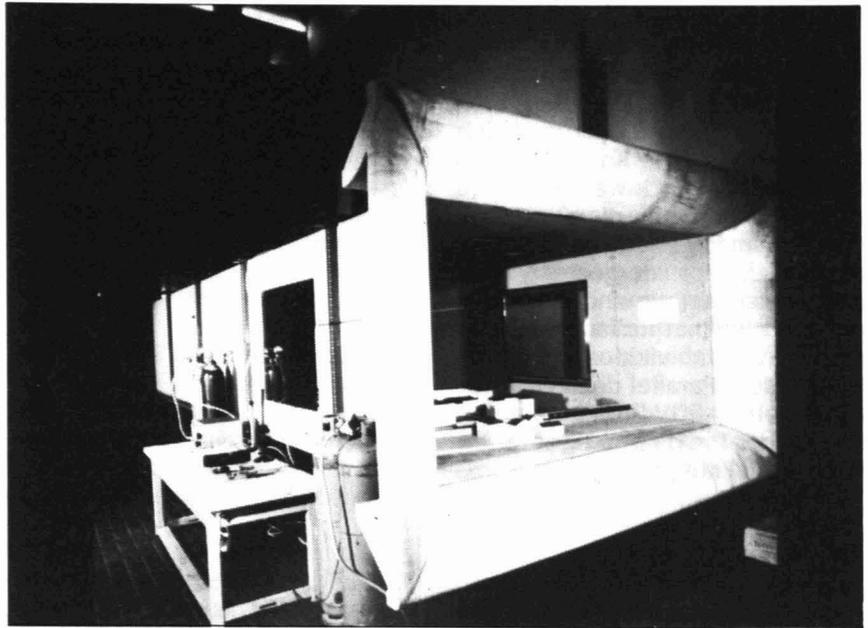


Abb. 9: Modellversuch zur Schadstoffausbreitung

- [7] WILLMANN, G.: Zustandsformen des Verkehrsablaufes. Schriftenreihe des Institutes für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 19, 1978.
- [8] Ausbreitung luftverunreinigender Stoffe. VDI Berichte 200, VDI-Verlag 1972.
- [9] Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen. Teil: Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung. M Lu S — 82, Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen, 1982.
- [10] STURM, P.J.: Dreidimensionale Schadstoffausbreitung bei einfacher Geometrie. Diplomarbeit TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 1984.
- [11] LANDFAHRER, K.: Untersuchung der Schadstoffausbreitung bei Tunnelportalen. Dissertation TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 1984.
- [12] PUCHER, K.: Schadstoffausbreitung und die Immissionen durch den Straßenverkehr. Vortrag beim Umweltschutzseminar »Grazer Luft 10 Jahre beobachtet«, Magistrat Graz, 1982.
- [13] Fachliche Grundlagen für die Emissionsbegrenzung luftverunreinigender Stoffe in Industrie und Gewerbe. Österreichisches Bundesinstitut für Gesundheitswesen, Wien 1977.