

## Der Straßenverkehr als Luftverschmutzer

**Der Kraftfahrzeugbestand hat seit 1978 jährlich um drei bis vier Prozent zugenommen und heute eine Größenordnung erreicht, die ihn zu einem wesentlichen Faktor der Luftverschmutzung werden läßt. Diese Quelle der Luftverschmutzung verteilt sich allerdings nicht gleichmäßig auf das gesamte Straßennetz der Bundesrepublik, sondern es sind insbesondere die Autobahnen, die einen erheblichen Beitrag an der Luftverschmutzung durch den Kfz-Verkehr liefern. Durch Untersuchungen der DLR zur Konzentrationsverteilung von Schadstoffkomponenten an Autobahnen werden Rückschlüsse möglich auf die Quellstärke eines Autobahnabschnitts, auf die Verteilung der Schadstoffe in der Atmosphäre und auf die Ausbreitungsprozesse, die die Schadstoffe verteilen.**

### Untersuchung der Ausbreitung von Autoabgasen an Autobahnen

Besonders in den westlichen Industriestaaten hat in den letzten Jahrzehnten der Kraftfahrzeugverkehr so stark zugenommen, daß er einen wesentlichen Anteil an der allgemeinen Luftverschmutzung darstellt. Die wichtigsten Quellen für Autoabgase sind die Großstädte, Autobahnen und stark befahrene Landstraßen. Nach Erhebungen des Umweltbundesamtes in Berlin (1989) [1] hat sich der Bestand an PKW und Kombis in der Bundesrepublik Deutschland von 21,2 Mio. (1978) auf 29,2 Mio. (Stand: 1.1.1989) erhöht. Das entspricht einer jährlichen Zunahme von drei bis vier Prozent. Seit 1975 hat der Bestand an Kraftfahrzeugen in der Bundesrepublik von 22,011 Mio. bis 1988 auf 33,505 Mio. zugenommen. Der Bestand an LKW änderte sich zwar in diesem Zeitraum nur wenig, dafür stieg aber die durchschnittlich installierte Motorleistung.

### Der Straßenverkehr als Luftverschmutzer

Obwohl die Fahrleistung der LKW, gemessen an allen Kraftfahrzeugen, nur

etwa 10% ausmacht (innerstädtischer Verkehr), tragen sie wegen der wesentlich höheren Motorleistungen zur Stickoxidemission ca. 40% und zur Rußemission sogar 75% bei. 80% der gesamten Verkehrsleistung in der Bundesrepublik, gemessen in Personenkilometern (Pkm), werden durch PKW aufgebracht, aber nur 7,2% durch die Eisenbahnen, 10,3% durch öffentliche Nahverkehrsmittel und nur 2,1% durch den Luftverkehr (Stand: 1985). Die spezifische Schadstoffemission (z. B. gemessen in g/ Pkm) ist bei Ottomotoren für Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide wesentlich höher als bei anderen Verkehrsmitteln, gering dagegen für Schwefeldioxid und Staub. Multipliziert man die personenkilometerbezogenen Emissionsraten mit den Fahrleistungen z. B. des Jahres 1985, so zeigt die *Tabelle 1*, daß die Gesamtemissionen (gemessen in kt/ a) aus dem PKW-Verkehr doch sehr beträchtlich sind.

Man sieht, daß die Schadstoffemissionen beim PKW-Verkehr, mit Ausnahme des SO<sub>2</sub>, um Zehnerpotenzen höher sind als bei den anderen Verkehrsarten. Daß dies beim SO<sub>2</sub> nicht der Fall ist, liegt daran, daß in Ottomotoren schwefelarmes Benzin verbrannt wird. In dieser Aufstellung, die nur den Verkehr zur

Personenbeförderung betrifft, ist der Güternah- und Fernverkehr noch nicht berücksichtigt, von dem sich mehr als 50% auf den Straßen abspielt.

Ein sehr erheblicher Teil des Personen- und Güterverkehrs findet auf den Autobahnen statt. In der *Tabelle 2* sind die verschiedenen Straßenverkehrswege gegenübergestellt.

Obwohl die Autobahnen, von der Länge her gesehen, am gesamten Verkehrsnetz nur einen geringen Anteil haben (1,7%), ist die durchschnittliche tägliche Verkehrsdichte (DTV) auf ihnen bei weitem am größten. Deshalb entfällt auf sie die höchste jährliche Fahrleistung von allen Verkehrswegen. Aus diesem Grunde liefern die Autobahnen einen erheblichen Beitrag an der gesamten Luftverschmutzung durch den Verkehr, insbesondere an Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (HC), Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) und Blei (Pb). Der Anteil des gesamten Verkehrs an verschiedenen Emissionen ist für die BRD in der *Tabelle 3* dargestellt.

Unter NO<sub>x</sub> verstehen wir die Summe der beiden Stickstoffoxidkomponenten NO und NO<sub>2</sub>. In der Atmosphäre kommen beide in unterschiedlichen Mengenverhältnissen vor.

Tabelle 1: Jährliche Gesamtemissionen von Schadstoffen beim Personenverkehr.

Verkehrsmittel	Verkehrsleistung 1985 (Mrd. Pkm)	CO (kt/ a)	HC (kt/ a)	NO <sub>x</sub> (kt/ a)	SO <sub>2</sub> (kt/ a)
Eisenbahn	43,5	5,7	2,8	28,5	33,3
PKW/ Kombi	481,6	5690,6	720,4	919,5	28,6
Öff. Nahverkehr	62,3	14,1	11,4	55,7	6,9
Luftverkehr	12,7	14,5	3,6	17,5	1,5

Tabelle 2: Straßennetz in der Bundesrepublik Deutschland. <sup>1)</sup> Quelle: UBA <sup>2)</sup> Quelle: BMV

Verkehrswege	Länge <sup>1)</sup> in km (1988)	Fahrleistung <sup>2)</sup> in Mrd. km (1987)	DTV <sup>2)</sup> (1985)
Gemeindestraßen	320000	88,2	k. Ang.
Kreisstraßen	70400	41,2	1420
Landesstraßen	63400	73,5	2840
Bundesstraßen	31200	92,9	7240
Autobahnen	8618	110,8	31390
Gesamtes Straßennetz	493618	406,6	



	NO <sub>x</sub>	VOC	CO	SO <sub>2</sub>	Staub
Verkehrsemission (Mt/ a) (1986)	1,55	1,18	6,20	0,07	0,05
Anteil in %	52,5	48,6	70,3	2,8	10,2

Tabelle 3: Anteil der Emissionen aus dem Straßenverkehr an den Gesamtemissionen.  
Quelle: UBA 1989 [1]

	PKW <sup>1)</sup> (Otto-Motor) g/ km	PKW (Diesel) g/ km	LKW u. Busse (Diesel) g/ km
CO	8,6	1,0	1,4 – 3,7
HC	1,5	0,1	1,3 – 4,7
NO <sub>x</sub>	2,0	0,8	7,7 – 25,8

Tabelle 4: Emissionsfaktoren für verschiedene Fahrzeugtypen auf Autobahnen.  
<sup>1)</sup> ohne Abgasreinigung

### Emission von Autoabgasen

Aufgrund des weitverzweigten Straßennetzes haben wir es bei den Autoabgasen mit einer sehr ausgedehnten Quelle zu tun. Wie aus Tabelle 3 hervorgeht, ist der Straßenverkehr vor allem für die Emission von Kohlenmonoxid, Stickstoffoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC = volatile organic compounds) verantwortlich. Zu den letzteren gehören die von Kraftfahrzeugen ausgehenden unverbrannten oder unvollständig verbrannten Treibstoffkomponenten. Außerdem werden erhebliche Mengen an bleihaltigen Partikeln emittiert, allerdings mit stark rückläufiger Tendenz, da bleihaltiges Normalbenzin in der Bundesrepublik seit dem 1. Februar 1988 ganz aus dem Markt genommen wurde.

Die Emissionsrate der Kraftfahrzeuge hängt außer von der Komponente wesentlich vom Fahrzustand (Geschwindigkeit, Anlassen, Beschleunigen) ab. Für die einzelnen Fahrzeugtypen kann nach Moussiopoulos et al. [2] mit mittleren Emissionsraten wie in Tabelle 4 gerechnet werden.

Durch Einsatz von Dreiwegekatalysatoren bei Ottomotoren gehen die Emissionswerte auf 10 bis 20% des Wertes ohne Abgasreinigung zurück. Das NO<sub>x</sub>-Gemisch im Auspuff von Kraftfahrzeugen besteht im allgemeinen zu etwa 95-98% aus NO und nur zu 2-5% aus NO<sub>2</sub>. Das Mengenverhältnis hängt außer vom Motortyp auch vom Fahrverhalten ab.

Der Emissionsvorgang bei Kraftfahrzeugen ist, was die Geometrie betrifft, ziemlich kompliziert: Ein einzelnes

Kraftfahrzeug stellt eine Punktquelle dar, die sich im allgemeinen entlang einer Linie bewegt. Wenn sich genügend viele Kraftfahrzeuge auf einer Straße befinden, kann man diese Straße als Linienquelle ansehen, bei der Emissionsstärken allerdings örtlich und zeitlich sehr unterschiedlich sein können. Eine Stadt repräsentiert, was die Kraftfahrzeugabgase betrifft, eine Flächenquelle.

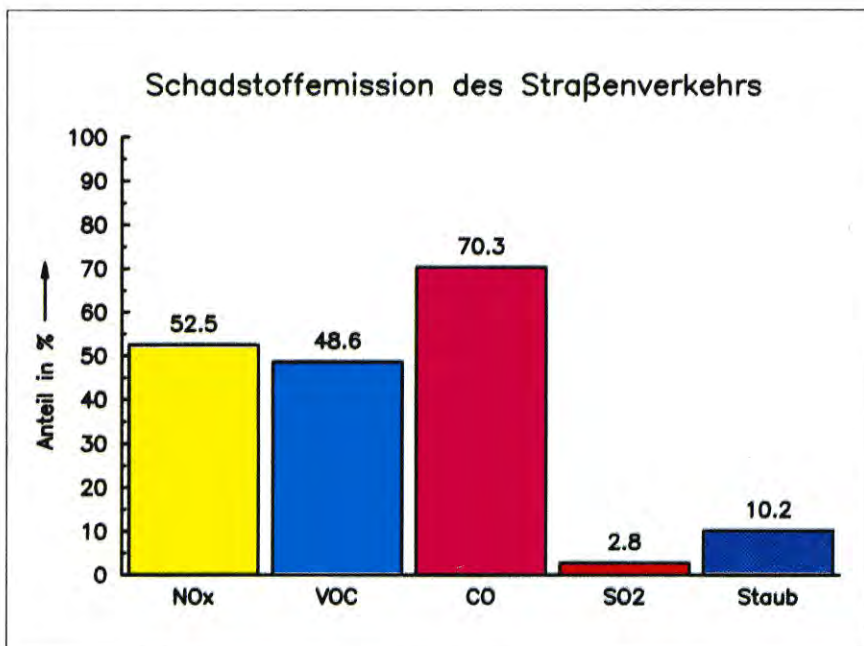
### Ausbreitung und Transport von Autoabgasen

Was geschieht nun mit den aus Kraftfahrzeugen emittierten Schadstoffen? Um die Frage beantworten zu können, welche Schädwirkungen aus den Kraftfahrzeugabgasen resultieren, muß man den weiten Weg der verschiedenen Abgaskomponenten in der Biosphäre untersuchen.

Bild 2 zeigt schematisch, wie man sich den weiteren Weg der Abgase aus Kraftfahrzeugen in der Biosphäre vorzustellen hat.

Die von den Kraftfahrzeugen emittierten Abgase werden mit dem Wind horizontal verfrachtet und dabei gleichzeitig durch turbulente Diffusion vertikal und horizontal (quer zur Strömungsrichtung) ausgebreitet. Das Maß dieser Ausbreitung ist von den meteorologischen Bedingungen abhängig. Durch Temperaturinversionen in der Atmosphäre wird eine vertikale Ausbreitung in vertikaler Richtung be- oder verhindert. In Bild 2 bezeichnet Z, die Höhe der Hauptinversion. Unter ihr liegt die sog. Mischungsschicht, in der sich die Transport- und Ausbreitungsprozesse überwiegend abspielen. Oberhalb der Mischungsschicht, die nachts und im Winter sehr schmal sein kann (100-500 m), im Sommer tagsüber aber auch über 2000 m ansteigen kann, findet sich ein Bereich mit verhältnismäßig sauberer Luft, da die Hauptinversion einen vertikalen Transport weitgehend unterbindet. Trotzdem wird durch den Tagesgang der Mischungsschichthöhe ein gewisser Austausch in die freie Atmosphäre bewirkt, der als „handover“ bezeichnet wird. Außerdem kommt auch durch Wolkenbildung und Absorption von Schadstoffen in Wolkentropfen ein Transport in die obere Atmosphäre zustande. Andererseits sorgen die Wolken über die Bildung von Niederschlagsprozessen wieder für die Reinigung der Atmosphäre. Damit werden die Schadstoffe bzw. ihre Umwandlungsprodukte wieder zum Boden zurücktransportiert (feuchte Deposition).

Bild 1: Beitrag des Straßenverkehrs an den Gesamtemissionen in der BRD (Gesamtemission = 100 % (Stand: 1986)).





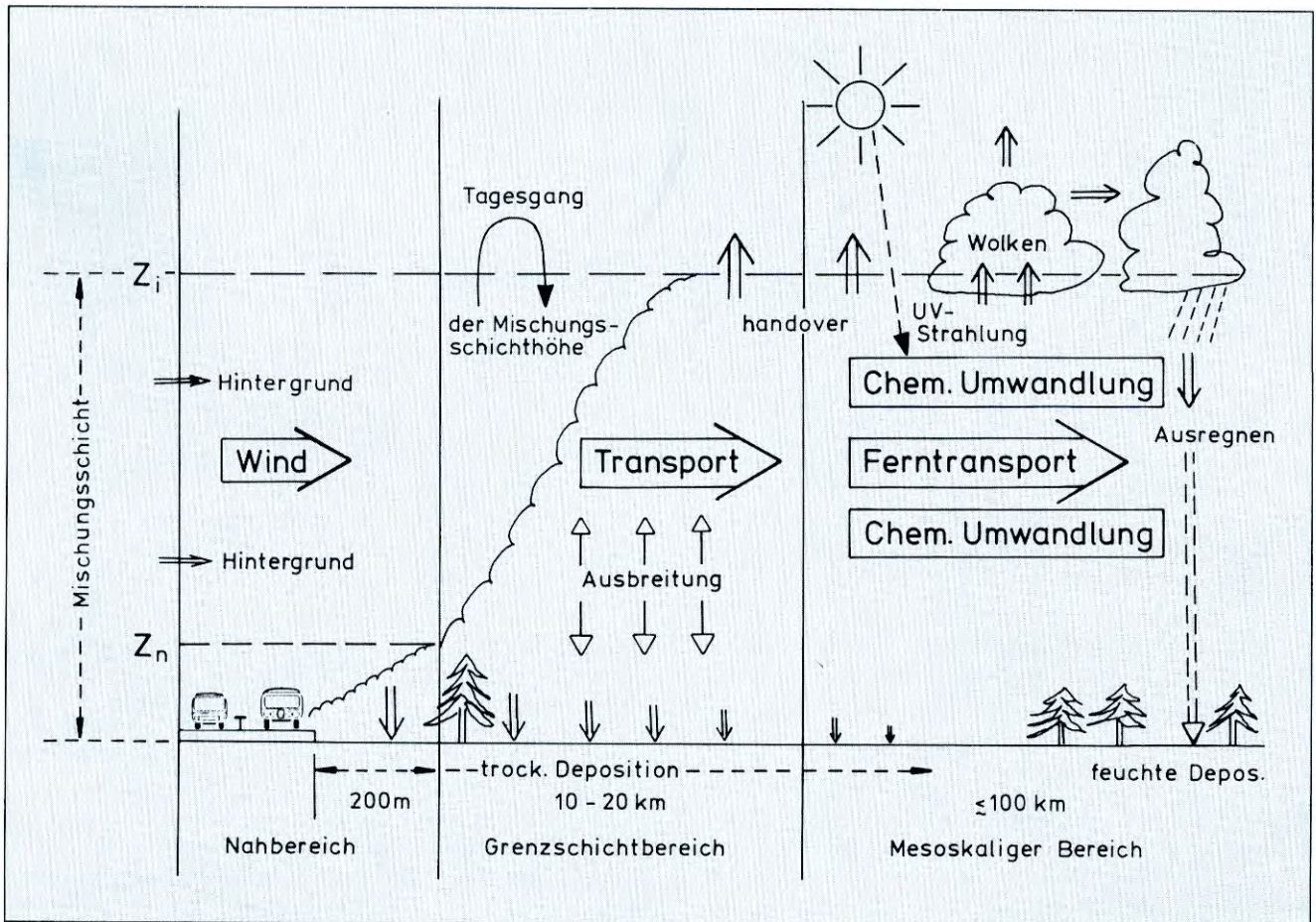


Bild 2: Wege der Autoabgase in der Biosphäre.

Darüber hinaus wird ein erheblicher Teil der Schadstoffe längs des Transportweges auf trockenem Wege am Erdboden bzw. an der Vegetation deponiert. Nach unseren Abschätzungen werden bei Annahme bestimmter meteorologischer Bedingungen (Windgeschwindigkeit = 3 m/s, vertikale Vermischungsgeschwindigkeit = 1 m/s, Mischungsschichthöhe = 1000 m, Depositionsgeschwindigkeit = 5 mm/s, Entrainmentgeschwindigkeit = 0,1 m/s) bereits 25% der Schadstoffe im Nahbereich deponiert, im Grenzschichtbereich nur noch etwa 1% und im gesamten mesoskaligen Bereich noch 2,5%, so daß ca. 30% auf die trockene Deposition entfallen und die restlichen 70% in die freie Troposphäre ausgetauscht werden. Im engen Nahbereich (bis etwa 100 m) tragen die Kraftfahrzeuge selbst durch ihren Einfluß auf die umgebende Luft zu einer Turbulenzanregung und Verwirbelung bei.

### Umwandlung von Autoabgasen

Die aus dem Auspuff der Fahrzeuge emittierten Stoffe reagieren im weiteren Verlauf miteinander und mit den in

der Umgebungsluft vorhandenen Substanzen. Die erste und schnellste Reaktion ist die Oxidation des emittierten Stickstoffmonoxids (NO) durch Ozon ( $O_3$ ) zu Stickstoffdioxid ( $NO_2$ ). Gerade diese Prozesse sind von besonderer Bedeutung für lufthygienische Überlegungen, weil auf diese Weise aus z. T. harmlosen Primärbestandteilen der Abgase (Vorläufersubstanzen) reaktive bzw. toxische Sekundärschadstoffe gebildet werden. Hierbei werden einerseits durch Oxidationsvorgänge und nachfolgende Anlagerung von Wasser aus den Primärsubstanzen Stickstoffoxid und Schwefeldioxid Salpetersäure und Schwefelsäure gebildet, die dann vornehmlich als feuchte (saure) Depositionen in den Erdboden gelangen. Andererseits kommt es bei starker Sonneneinstrahlung und hohen Temperaturen zu photochemischen Reaktionen zwischen den in der Atmosphäre vorhandenen natürlichen Gasen Sauerstoff, Ozon, Wasserstoff, Kohlenmonoxid und verschiedenen Radikalen mit den primären Abgaskomponenten, vor allem Stickstoffoxiden, Kohlenwasserstoffen und Partikeln, die zu einer Bildung von reaktiven bzw. toxischen Photooxidantien (u. a. Ozon, Peroxiacetyl-

nitrat (PAN), Wasserstoffperoxid) führen. Da, wie aus Tabelle 1 hervorgeht, der Verkehr etwa zur Hälfte an der Emission der Vorläufersubstanzen  $NO_x$  und HC beteiligt ist, werden bei photochemischen Bedingungen allein durch die Kraftfahrzeuge großflächig und im großen Umfang Photooxidantien gebildet, die sich in der Atmosphäre anreichern und zu einem allmählichen Anstieg der troposphärischen Ozonkonzentration führen. Bei Flugzeugmessungen in der Abgasfahne der Stadt München konnte die Ozonproduktion durch photochemische Reaktionen deutlich nachgewiesen werden [3]. Bei Straßen und Autobahnen ist eine meßtechnische Detektion photochemischer Ozonerzeugung allerdings nicht möglich, da der Einzelbeitrag eines Autobahnabschnittes erst in größerer Entfernung von der Quelle in Erscheinung treten würde und hier dann von der Summe der Effekte der vielen anderen Quellen verdeckt wird.

### Flugzeugmessungen in Abgasfahnen von Autobahnen

Das Institut für Physik der Atmosphäre



der DLR hat schon seit einigen Jahren versucht, die Konzentrationsverteilung von Schadstoffkomponenten an Autobahnen zu erfassen. Die Ergebnisse solcher Messungen lassen Rückschlüsse zu auf die Quellstärke eines Autobahnabschnitts, auf die Verteilung der Schadstoffe in der Atmosphäre und auf die Ausbreitungsprozesse, die die Schadstoffe verteilen. Außerdem lassen sich die für die Modellierung solcher Prozesse notwendigen Eingabeparameter erfassen, und die Modelle können mit den gewonnenen Meßergebnissen validiert werden.

Im folgenden werden einige Beispiele von Meßergebnissen gezeigt, die mit dem DLR-Meßflugzeug Queen Air Be-65 an einer Autobahn erhalten wurden. Das Flugmuster ist schematisch in *Bild 3* dargestellt.

Die *Bilder 4-9* zeigen Beispiele für die mit dem Flugzeug an der Autobahn München-Stuttgart gemessenen räumlichen Verteilungen der Lufttemperatur, der relativen Feuchte der Luft, der Abgaskomponenten NO, NO<sub>x</sub>, sowie der Aitkenpartikeln und des Ozons. Die Meßfläche ist eine vertikale Ebene, die etwa senkrecht zur Autobahn und parallel zur Windrichtung verläuft (siehe *Bild 3*). Die unterste Meßhöhe liegt etwa 100 m über Grund. (In den Bildern ist die Lage der Autobahn in der Meßfläche mit A gekennzeichnet.)

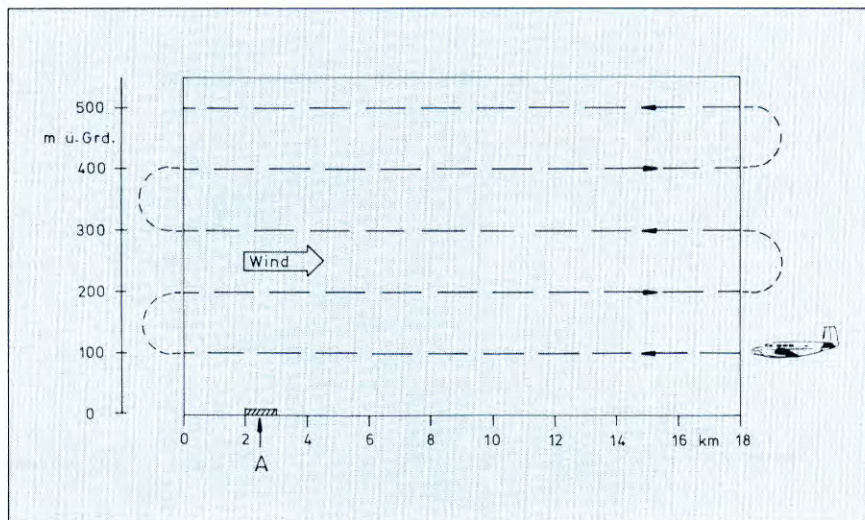


Bild 3: Schematisches Flugmuster.

Messungen der meteorologischen Parameter Temperatur und Feuchte sind wichtig zur Erfassung der atmosphärischen Struktur. Die Temperaturmessung zeigt eine weitgehend gleichförmige Verteilung über der Meßebene: Inversionsschichten sind nicht vorhanden. Ein Einfluß der Autobahn ist nicht erkennbar. Die Feuchteverteilung ist eine Funktion der Temperaturverteilung, von Wasserdampfquellen am Erdboden und von vielen anderen Faktoren. Auch hier ist ein Einfluß der Autobahn nicht zu erkennen.

Deutliche Auswirkungen zeigt aber die Autobahn auf die Verteilung der Stickstoffoxide, der Aitkenpartikeln und des Ozons. Im Bereich der Autobahn wird die Atmosphäre deutlich mit NO, NO<sub>x</sub> und Aitkenpartikeln angereichert. Diese Anreicherung erstreckt sich beim NO horizontal bis zu einer Entfernung von ca. 8 km, vertikal bis mehr als 300 m über Grund, beim NO<sub>x</sub> horizontal auf mehr als 12 km, vertikal ebenfalls über 300 m, während bei den Aitkenkernen horizontal die Wirkung nur bis etwa 7 km geht. Dies hängt mit der kürzeren Lebens-

Bild 4: Vertikale Temperaturverteilung an der Autobahn.

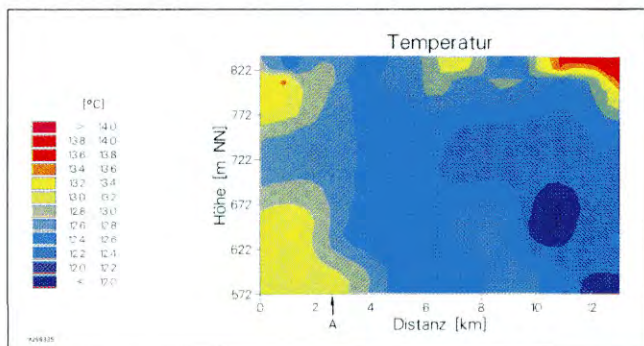


Bild 5: Vertikale Feuchteverteilung an der Autobahn.

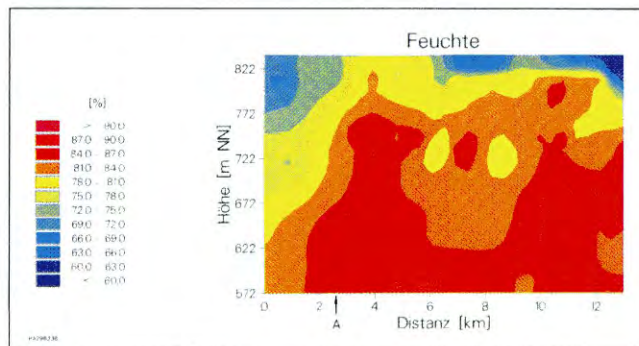


Bild 6: Vertikale NO-Konzentrationsverteilung an der Autobahn.

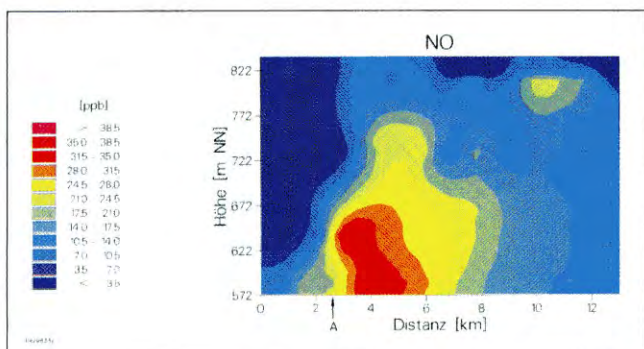
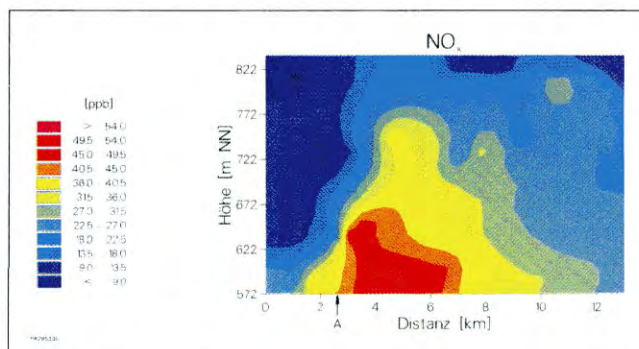


Bild 7: Vertikale NO<sub>x</sub>-Konzentrationsverteilung an der Autobahn.





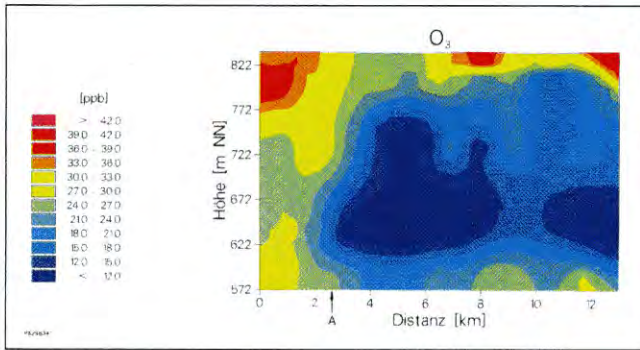


Bild 8: Vertikale Ozon-Konzentrationsverteilung an der Autobahn.

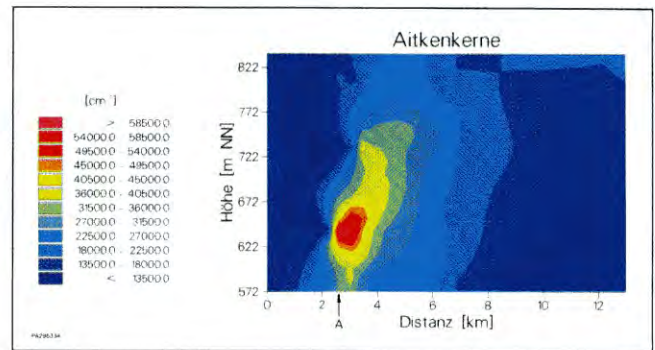


Bild 9: Vertikale Konzentrationsverteilung von Aitkenkernen an der Autobahn.

dauer dieser Teilchen zusammen, die sich relativ schnell an größere Teilchen anlagern. Beim Ozon finden wir im Lee der Autobahn einen Bereich drastisch verringerter Ozonkonzentration, der durch die Reaktion des  $O_3$  mit dem  $NO$  zustandekommt, bei der das Ozon zerstört wird.

Aus verschiedenen an Autobahnen vorgenommenen Flugzeugmessungen konnten aufgrund der Konzentrationswerte und der Windgeschwindigkeiten Massenflüsse für Stickstoffoxide abgeschätzt werden (Tabelle 5).

Wenn man die Messungen in unmittelbarer Nähe der Quelle macht und man deshalb annehmen kann, daß eine merkliche Deposition und Umwandlung noch nicht stattgefunden hat, entspricht der gemessene Massenfluß von  $NO_x$  etwa der Emissionsrate des Autobahnabschnitts. Die Oxidation des  $NO$  zu  $NO_2$  kann allerdings so schnell vor sich gehen, daß das mit dem Flugzeug gemessene  $NO/NO_2$ -Massenflußverhältnis nicht dem am Auspuff entspricht. Auf die Summe  $NO_x = NO + NO_2$  wirkt sich das allerdings nicht aus. Die Massenflüsse der drei untersuchten Abschnitte sind bezüglich des  $NO_x$  sehr ähnlich, nur ist im ersten Fall (Autobahn München-Stuttgart) das  $NO/NO_2$ -Verhältnis ein anderes ( $NO/NO_2 = 3,4$ ) als an den beiden anderen Abschnitten ( $NO/NO_2 = 0,38$  bzw.  $0,53$ ). Dieser Unterschied kann durch unterschiedliche atmosphärische Bedingungen begründet sein: Im ersten Fall ist die Windgeschwindigkeit sehr klein und daher die Reibungsturbulenz und die Durchmischung der Abgase mit dem atmosphärischen Hintergrundozon gering. Die Folge ist eine langsame Oxidation des aus den Auspuffanlagen emittierten  $NO$  zu  $NO_2$ . In den beiden anderen Fällen war die Windgeschwindigkeit doppelt so hoch und führte deshalb zu einer schnelleren Oxidation des  $NO$ .

### Modellierung der Ausbreitung von Autoabgasen

Neben den Meßflügen bieten Simulationen mit einem numerischen Modell die Möglichkeit, die Verteilung von Schadstoffen in der Umgebung einer Autobahn zu untersuchen. Da die vertikale Ausbreitung im Grenzschichtbereich

Tabelle 5: Stickstoffoxidmassenflüsse an Autobahnabschnitten im Raum München (Abschätzungen aus Flugzeugmessungen).

Autobahn München-Stuttgart (b. Augsburg): (21.10.82, mittags); Wind: 1–2 ms;			
	Konz. i. Luv ppb	Konz. i. Lee ppb	Massenfluß g/ s/ km
$NO$	10	35	6,7–13,4
$NO_2$	13	18	2–4
$NO_x$	23	53	8,7–17,4
Autobahn München-Salzburg (Hofoldinginger Forst): (22.02.88, mittags); Wind: 3 ms; Verkehrsdichte: 35 PKW + 8 LKW auf 260 m Länge (6spurig)			
	Konz. i. Luv ppb	Konz. i. Lee ppb	Massenfluß g/ s/ km
$NO$	4	8	3,2
$NO_2$	12	19	8,4
$NO_x$	16	27	11,6
Autobahn München-Nürnberg (b. Allershausen): (22.02.88, mittags); Wind: 3 ms;			
	Konz. i. Luv ppb	Konz. i. Lee ppb	Massenfluß g/ s/ km
$NO$	13	17	3,2
$NO_2$	27	32	6
$NO_x$	40	49	9,2

erfolgt, ist dazu ein Modell erforderlich, das in der Lage ist, die meteorologischen Phänomene in der Grenzschicht zu erfassen.

In der Meteorologie wird zwischen neutralen, stabilen und labilen Grenzschichten unterschieden. Für die Simulation der Verteilung von Autoabgasen ist der labile Fall von Bedeutung, da tagsüber, wenn die Verkehrsdichte am größten ist, meistens eine labile (konvektive) Grenzschicht vorherrscht.

Mit dem am Institut für Physik der Atmosphäre entwickelten Large-Eddy-Simulation-Modell „Mesoscop“ [4] ist es möglich, die typischen Grenzschichtstrukturen und somit auch die Ausbreitung von Schadstoffen in der Grenzschicht zu simulieren. Mit diesem Modell können die dreidimensionalen und instationären Bewegungen der turbulenten Elemente („Eddies“) explizit numerisch simuliert werden. Die Effekte der kleinerskaligen Turbulenz werden in parameterisierter Form berücksichtigt. Dieses Modell benötigt allerdings viel Speicherplatz und Rechenzeit auf einem Großcomputer. Einfachere Modelle können für diese Aufgabenstellung nicht angewandt werden, da damit der in der Grenzschicht beobachtete Schadstofffluß gegen den Gradienten nicht erfaßt werden kann [5].

Die dem Modell zugrundegelegte Gebietsgröße beträgt typischerweise  $10 \times 10 \text{ km}^2$  in horizontaler Richtung und reicht bis in eine Höhe von 2500 m. Somit wird die atmosphärische Grenzschicht erfaßt. Die horizontale und vertikale Auflösung sollte 50 bis 100 m betragen, daraus ergibt sich ein Maschenetz von ca.  $100^3$  Maschen. Für die Simulation der Schadstoffausbreitung wird neben den Grundgleichungen des Modells zusätzlich eine prognostische Gleichung für einen passiven Tracer gelöst. Die Emissionen entlang der Autobahn werden im Modell in Form einer Li-



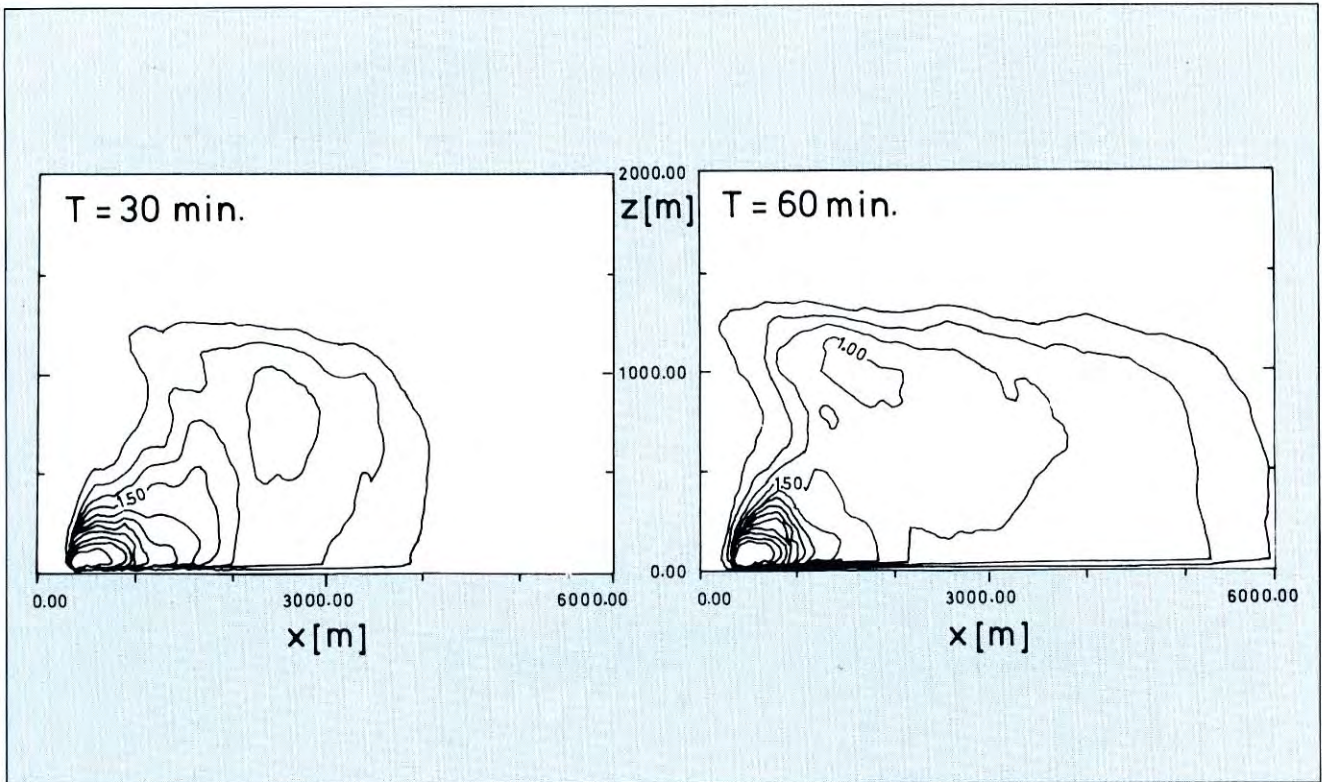


Bild 11: In y-Richtung integrierte Konzentrationsverteilungen nach 30 bzw. 60 Minuten Simulationszeit.

nienquelle in y-Richtung quer zur vorherrschenden Windrichtung berücksichtigt (Bild 10). Die Anfangswerte für die Schadstoffkonzentration und die Konzentrationen am Einströmrand werden Null gesetzt. Das Modell berechnet folglich eine Schadstoffverteilung, die nur auf die Emissionen der Kraftfahrzeuge zurückzuführen ist. Hintergrundkonzentrationen und die Auswirkung anderer möglicher Quellen werden nicht erfaßt. In Bild 11 ist die berechnete Konzentrationsverteilung in xz-Schnitten dargestellt, die sich nach 30 bzw. 60 Minuten ergibt.

Die vom Modell für eine Vertikalebene berechneten Linien sind Linien gleicher Konzentration für ein als chemisch inert angenommenes Auspuffabgas. Die Werte wurden dabei in y-Richtung integriert, da die meteorologischen Größen

horizontal homogen angenommen wurden. Die Abgase der Kraftfahrzeuge werden zunächst in der konvektiven Grenzschicht nach oben verfrachtet (s. hierzu auch die Meßergebnisse in Bild 6, Bild 7 und Bild 9) und breiten sich erst dann horizontal aus. Unterhalb der Grenzschicht bildet sich ein sekundäres Maximum. Dieses Modellergebnis stimmt gut mit Laborversuchen überein, die auch ein zweites Maximum zeigen. Die Übereinstimmung mit den Flugzeugmessungen ist ebenfalls befriedigend.

### Schrifttum

- [1] Umweltbundesamt (Hrg.), 1989  
Daten zur Umwelt 1988/89. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin
- [2] Moussiopoulos, N., Oehler, W., Zellner, K.  
Kraftfahrzeugemissionen und Ozonbildung. Springer Verlag 1989.
- [3] Paffrath, D., Peters, W.  
Flugzeugmessungen für die Luftreinhaltung. Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (Hrg.). Broschüre im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen. 33 Seiten, 28 Bilder, 1988.
- [4] Schumann, U., Volkert H., Hauf, T., Höller, H., Schmidt, H.  
A Mesoscale Model for the Simulation of Turbulence, Clouds, and Flow over Mountains: Formulation and Validation Examples. Contr. Phys. Atmos. 60, 413–446, 1987.
- [5] Sun, W.-Y.  
Air Pollution in a Convective Boundary Layer. Atmos. Environ. 20 1877 – 1886, 1986.

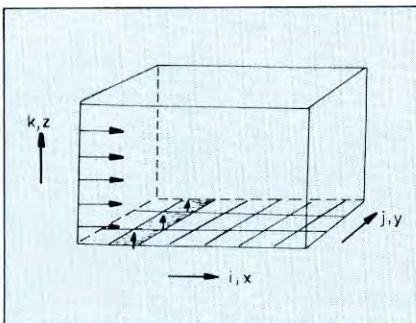


Bild 10: Linienquelle im Modellgebiet (Box). Die Pfeile an der vertikalen Achse geben die vorherrschende Windrichtung an.