

Information über Abgase des Kraftfahrzeugverkehrs



„Freude am Fahren“ bei den Garamanten; Felszeichnung Sahara ca. 500 v.Chr. Aufn. A. Rabl

Inhalt:

1. Allgemeines
2. Kfz-spezifische Emissionen
 - 2.1 Gesetzliche Grundlagen zur Emissionsbeschränkung von Fahrzeugen
 - 2.2 Kraftstoffbezogene Reglementierungen
 - 2.3 Emissionen der Kraftfahrzeuge
 - 2.4 Abgasreinigungstechnik
 - 2.5 Einflüsse des Kraftstoffs
 - 2.6 Sonstige Minderung von Kfz-Emissionen
 - 2.6.1 Individuelle Möglichkeiten zur Emissionsminderung
 - 2.6.2 Emissionsminderung durch Verkehrslenkung und Verkehrsplanung
3. Immissionen an Straßen
 - 3.1 Rechtliche Grundlagen, Immissionswerte
 - 3.2 Immissionssituation an Straßen
 - 3.3 Einträge von straßenverkehrsbedingten Immissionen in Böden
4. Wirkung kfz-spezifischer Immissionen auf den Menschen und Beurteilung
5. Zusammenfassung

1. Allgemeines

Die rapide Entwicklung des Straßenverkehrs in den letzten fünfzig Jahren mit heute etwa 53 Millionen Kraftfahrzeugen (Kfz) in Deutschland hat dazu geführt, dass diese Emittentengruppe bundesweit im Vergleich zu anderen Quellengruppen, wie Industrie, Haushaltungen und Gewerbe, den Hauptanteil der Luftschadstoffe Kohlenmonoxid (51 %) und Stickstoffoxide (45 %) und einen nicht unerheblichen Teil der flüchtigen organischen Verbindungen (21 %) emittiert¹. Wegen der geringen Freisetzungshöhe tragen Emissionen des Kfz-Verkehrs im Innerortsbereich zu über 80 % der bodennahen Immissionen bei. Obwohl seit Mitte der 70er Jahre Emissionsbeschränkungen für Kraftfahrzeuge existieren und seit 1985 verstärkt Maßnahmen zur Schadstoffminderung bei Pkw ergriffen werden, gehen die kfz-bedingten Emissionen aufgrund steigender Zulassungszahlen und Fahrleistungen z. T. nur langsam zurück. Während in den letzten 20 Jahren bei Kohlenmonoxid und Blei eine stetige, deutliche Abnahme der Emissionen und Immissionen festzustellen war, werden bei Kohlenwasserstoffen und Gesamtstickstoffoxiden erst seit Beginn der 90er Jahre erkennbar rückläufige Tendenzen der Immissionen registriert². Obwohl die zwischen 1990 und 2000 verkehrsbedingten Stickstoffoxidemissionen um 32 % und die Dieselrußemissionen um 20 % vermindert worden sind, weisen jedoch die straßennahen Immissionen von Stickstoffdioxid und Feinstaub in den letzten zehn Jahren kaum Rückgänge auf.

2. Kfz-spezifische Emissionen

2.1 Gesetzliche Grundlagen zur Emissionsbeschränkung von Fahrzeugen

Die Straßenverkehrs-Zulassungsordnung (StVZO)³ schreibt für die Typzulassung neuer Kraftfahrzeuge und das Abgasverhalten in Betrieb befindlicher Kfz die Einhaltung bestimmter **Emissionsgrenzwerte** für die Komponenten Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x), flüchtige organische Verbindungen (CH) und Partikel vor. Dabei ist die Typzulassung von Pkw einheitlich auf einen Rollen-Prüfstandstest (neuer **Euro-patest**, MVEG-Test) zu beziehen, der aus vier gleichartigen Stadt-Fahrzyklen und einem außerstädtischen Fahrzyklus besteht. Ab der Grenzwertstufe Euro 3 ist (ab dem Jahr 2000) ein modifizierter Test vorgeschrieben, der im Gegensatz zu früheren Verfahren die Kaltstartphase voll berücksichtigt und eine teilweise Verschärfung der Grenzwerte bedeutet. Die europaweit gültigen und für 2005 beschlossenen bzw. angestrebten **Abgasgrenzwerte für Pkw** sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Europäische Abgasgrenzwerte für neue Pkw (g/km)

Betriebsart	Komponenten	EU-Richtlinien				
		91/441/EWG		94/12/ED	98/69/ED	
		Euro 1 seit 1992/93 Serie	Typ	Euro 2 ab 1996/97 Typ + Serie	Euro 3 ab 2000/01	Euro 4 ab 2005 Typ + Serie
Otto (Benzin)	CO	3,16	2,72	2,2	2,3	1,0
	CH	1,13	als 0,97	0,5 als	0,2	0,1
	NO _x	Summe CH+NO _x		Summe CH+NO _x	0,15	0,08
Diesel	CO	3,16	2,72	1,0	0,64	0,50
	CH + NO _x	1,13	0,97	0,7 (0,9*)	0,56	0,30
	NO _x	--		-	0,50	0,25
	Partikel	0,18	0,14	0,08 (0,10*)	0,05	0,025

*) Pkw mit Direkteinspritzmotoren

Für neuzugelassene Ottomotor-Pkw sind ab dem Jahr 2000 **On-Board-Diagnose**-Systeme verpflichtend, die die Funktion der Abgasreinigungseinrichtungen gewährleisten. Für neuzugelassene Diesel-Pkw gilt diese Vorschrift ab 2003. Für Leichte Nutzfahrzeuge orientieren sich die Grenzwerte in der Größenordnung an denen für Pkw; bei schwereren Fahrzeugen sind jedoch etwas höhere Werte zulässig.

¹ Umweltbundesamt, Daten zur Umwelt Schätzwerte 2000, Berlin 2002

² Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Lufthygienische Jahresberichte 1975 bis 2000

³ Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) i.d.F. v. 28.09.1988 BGBl I, 10793, z. g. am 11.12.2001, BGBl I, S. 3617

Für motorisierte **Zweiräder und Mopeds** sind auf ähnliche Prüfstandszyklen festgelegte Abgasgrenzwerte europaweit seit 1997 gültig. Die erste Reglementierung erfolgte allerdings 1994 auf nationaler Ebene. Die Werte sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Für drei- bzw. vierrädrige Krafträder gilt das 1,5- bzw. 2-Fache der Grenzwerte für Zweiräder.

Bei **Lastkraftwagen und Bussen** sind die Emissionsgrenzwerte nicht wie bei Pkw und Krafträdern streckenbezogen, sondern nach einem 13-stufigen Prüfstandstest leistungsbezogen definiert. Dieses stationäre Testverfahren soll allerdings durch ein dynamisches ersetzt werden, welches realitätsnahe Lastwechselstufen enthält. Die Abgasgrenzwerte für Lkw und Busse bis zur Stufe Euro 5 sind in Tabelle 3 enthalten. Auch für Lkw werden ab Euro 3 On-Board-Diagnosesysteme für den Emissionszustand erforderlich sein.

Tabelle 2: Abgasgrenzwerte für Motorräder und Mopeds (g/km)

Motorräder	Komponenten	National ECE-R40/01 seit 1994	EU-Richtlinie 97/24/EG	
			Euro 1 ab 1999	Euro 2 Vorschlag
2-Takt	CO	16,0 - 40,0	8,0	3,0
4-Takt		21,0 - 42,0	13,0	3,0
2-Takt	CH	10,4-16,8	4,0	1,0
4-Takt		6,0-8,4	3,0	1,0
2-Takt	NO _x	-	0,1	0,3
4-Takt		-	0,3	0,3
Testverfahren		Stadtzyklus	Stadtzyklus	wie bei Pkw
Mopeds (2-Takt)		National ECE-R47/01 seit 1989	EU-Richtlinie 97/24/EG	
			Euro 1 ab 1999	Euro 2 ab 2002
	CO	9,6	6,0	1,0
	CH	6,5	-	-
	CH+ NO _x	-	3,0	1,2
Testverfahren		Stadtzyklus	Stadtzyklus	Stadtzyklus

Tabelle 3: Abgasgrenzwerte für neue Lkw und Busse (g/kWh)

EU-Richtlinien	88/77/EWG	91/542/EWG		99/96/EG				
	Euro 0 seit 1988/90	Euro 1 seit 1992/93	Euro 2 seit 1995/96	Euro 3 ab 2000/01		Euro 4 ab 2005	Euro 5 ab 2008	EEV ⁷⁾
CO	12,3	4,9	4,0	2,1	5,45	4,0	4,0	3,0
CH	2,6	1,23	1,1	0,66	0,78	0,55	0,55	0,4
Methan	-	-	-	-	1,6 ⁴⁾	1,1 ⁴⁾	1,1 ⁴⁾	0,66
NO _x	15,8	9,0	7,0	5,0	5,0	3,5	2,0	2,0
Partikel	-	0,4/ 0,68 ⁸⁾	0,15	0,1/ 0,13 ⁵⁾	0,16/0,21 ⁵⁾	0,03 ⁵⁾	0,03 ⁵⁾	0,02
Rauchtrübung	-	-	-	0,8 m ⁻¹ ⁶⁾	-	0,5 m ⁻¹ ⁶⁾	0,5 m ⁻¹ ⁶⁾	0,15 m ⁻¹ ⁶⁾
Testverfahren	13-Stufentest	13-Stufentest	13-Stufentest	ESC-Test und ELR- Test ¹⁾	ETC-Test ^{2,3)}			

1) geändertes/verschärftes Verfahren für Dieselmotoren, gilt auch für Euro 4 und 5 (Werte teilw. weggelassen)

2) zusätzlicher Transienten-Test für Dieselmotoren mit Abgasnachbehandlungssystemen

3) Für Gasmotoren nur Transienten-Test

4) Nur für Erdgasmotoren

5) Nur für Dieselmotoren

6) Trübungsmessung nach ESC- und ELR-Test

7) Besonders umweltfreundliche Fahrzeuge

8) Für Lkw ≤ 85 kW

Wiederkehrende **Abgasuntersuchungen (AU)** nach §§ 47a und b StVZO sind ab 01.12.1993 für alle Kfz, ausgenommen Krafträder, verbindlich und ersetzen die früher bei konventionellen Otto-Pkw vorgeschriebene Abgassonderuntersuchung (ASU). Die Untersuchungszyklen liegen bei konventionellen Otto- und Diesel-Kfz bei 12 Monaten, bei Kfz mit G-Kat und besonders schadstoffarmen Dieselmotoren bei 24 Monaten. Die erste Untersuchung muss bei den beiden letztgenannten Kfz-Kategorien erst 36 Monate nach der ersten Zulassung erfolgen. Es werden folgende Komponenten temperatur- und drehzahlbezogen bestimmt:

Kfz mit Ottomotoren: CO, CO₂, CH, O₂ bei Leerlauf und erhöhter Drehzahl
 Kfz mit Dieselmotoren: Partikel (Rauchtrübung) bei Leerlauf und erhöhter Drehzahl.

2.2 Kraftstoffbezogene Reglementierungen

Kraftstoffbedingte Emissionen sind seit Mitte der 70er Jahre durch das Benzin-Bleigesetz reglementiert, das seit dem 01.01.1976 die höchstzulässige Konzentration **organischer Bleiverbindungen** im Ottokraftstoff auf 0,15 g Pb/l limitiert⁴. Die Richtlinie 85/210/EWG - Bleigehalt in Benzin - verlangte auch von den EU-Mitgliedstaaten, den zulässigen Benzinbleigehalt auf 0,15 g Pb/l zu senken und vom 01.10.1989 an unverbleites Benzin, d. h. Benzin mit einem Bleigehalt von < 0,013 g Pb/l, zur Verfügung zu stellen. Unverbleites Benzin muss bei der Abgabe an der Tankstelle eindeutig gekennzeichnet sein.

Bleifreies Benzin war in Deutschland schon in den 50er und 60er Jahren im Handel (z.B. „Aral bleifrei“). Seit 1983 ist es zum Betrieb der in zunehmendem Maß eingeführten Katalysator-Fahrzeuge wieder auf dem Markt. Seit 1998 wird in Deutschland nur noch unverbleites Benzin vertrieben. Die im Rahmen des Auto-Öl-Programms der Europäischen Union EU im Kraftstoffbereich vorgesehenen Verbesserungen sind in der Kraftstoffrichtlinie 98/70/EG u.a. folgende Parameter neu festgelegt:

<u>Ottomotorkraftstoffe:</u>	ab 01.01.2000	ab 01.01.2005
max. Schwefelgehalt (ppm):	150	50
max. Benzolgehalt (Vol.%):	1,0	1,0
max. Aromatengehalt (Vol.%):	42	35
max. Olefingehalt (Vol%):	18	18
max. Sauerstoffgehalt (Gew.%)	2,7	2,7
max. Bleigehalt (g Pb/l)	0,013	0,013

<u>Dieselmotorkraftstoff:</u>	Jahr 2000	Jahr 2005
max. Schwefelgehalt (ppm):	350	50
max. Polyaromatengehalt (Gew.%)	11	11
min. Cetanzahl	51	51

Die 10. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 13.12.1993⁵ setzt diese Richtlinie in nationales Recht um und regelt unter Verweis auf die einschlägigen DIN-Normen die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten der in den Handel gebrachten Otto-, Diesel- und gasförmiger Kraftstoffsorten (unverbleite Ottokraftstoffe: DIN EN 228, Ausgabe Februar 2000; verbleite Ottokraftstoffe: DIN 51600; Dieselmotorkraftstoffe: DIN EN 590, Ausgabe Februar 2000; Flüssiggas: DIN EN 589).

Es gibt derzeit politische Bestrebungen, die für das Jahr 2005 vorgesehenen Regelungen auf dem Wege über steuerliche Regelungen eher einzuführen. Seit dem 01.01.2000 wird die Benzinqualität „Super-plus“ mit ≤ 50 ppm **Schwefel** angeboten; ab 01.11.2001 ist sie praktisch schwefelfrei (≤ 10 ppm). Gemäß einer

⁴ Gesetz zur Verminderung von Luftverunreinigungen durch Bleiverbindungen in Ottokraftstoffen für Kraftfahrzeugmotoren (Benzinbleigesetz - BzBl1G) i.d.F. vom 18.12.1987, BGBl I S. 2810, z. g. am 24.06.1994, BGBl. I S. 1416

⁵ 10. Verordnung zur Durchführung des BImSchG (10. BImSchV) - Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraftstoffen vom 13.12.1993, BGBl. I S. 2036 z. g. am 22.12.1999, BGBl. I, S. 2845)

freiwilligen Vereinbarung zwischen Bundesregierung, Automobilindustrie und Mineralölwirtschaft vom Sommer 1999 sind die für 2005 vorgeschriebenen Otto- und Dieselmotorkraftstoffqualitäten bereits ab 01.11.2001 verfügbar. Für Qualitäten, die zu diesem Zeitpunkt noch die für 2005 vorgeschriebenen Schwefelgehalte überschreiten, werden zusätzliche Steuern von €0,015/l erhoben. Mit einer weiteren, gleich hohen Steuer sollen Kraftstoffe belegt werden, die ab dem 01.01.2003 mehr als 10 ppm Schwefel aufweisen. Dazu müsste aber die o.g. Kraftstoffrichtlinie 98/70/EG geändert werden. Die Bundesregierung hat dazu bei der EU-Kommission die Fortschreibung der Richtlinie mit einem ab dem Jahr 2007 gültigen maximalen Schwefelgehalt von 10 ppm in Kraftstoffen notifizieren lassen. Der EU-Ministerrat hat die von der Bundesregierung vorgesehenen steuerlichen Maßnahmen gebilligt.

In der 19. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 17.01.1992⁶ wurde die Beimischung von **Chlor- und Bromverbindungen** als Scavenger für bleihaltiges Benzin verboten. Damit sind die Emissionen **polyhalogener Dibenzodioxine und -furane** aus dem Kfz-Verkehr nahezu verschwunden.

Minderungen der Emissionen **flüchtiger organischer Verbindungen** beim Kraftstoffumschlag sind seit Inkrafttreten der 20. und 21. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz^{7,8} eingetreten. Diese schreiben eine Begrenzung der Kohlenwasserstoffemissionen beim Umfüllen und Lagern von Ottokraftstoffen bzw. beim Betanken von Kfz z.B. durch Einsatz von Gaspendelverfahren vor. Die 20. BImSchV gilt für alle Tanklager und Tankstellen sowie für bewegliche Behälter (Straßentankwagen und Eisenbahnkesselwagen). Sie gilt nicht für Tankstellen, die vor dem 04.06.1998 errichtet worden sind und deren jährliche Abgabemenge an Ottokraftstoff 100 m³ nicht überschreitet. Die 21. BImSchV, die seit dem 01.01.1993 in Kraft ist, gilt nach Ablauf aller Übergangsfristen seit Ende 1997 für Tankstellen mit Abgabemengen über 1000 m³/Jahr. Allerdings haben Messungen und technische Überprüfungen an Tankstellen in den Jahren 1999 und 2000 ergeben, dass die Gasrückführungssysteme ("Saugrüssel") häufig Mängel aufweisen oder ganz ausgefallen sind. Um den bestimmungsgemäßen Betrieb der Gasrückführungssysteme zukünftig sicher zu stellen, müssen zusätzliche, über die Anforderungen der geltenden 21. BImSchV hinausgehende Maßnahmen insbesondere zur Verbesserung der Überwachung, getroffen werden. Hierzu sieht die Änderungsverordnung zur 21. BImSchV⁹ einige Neuregelungen, wie automatische Überwachungseinrichtungen, vor.

2.3 Emissionen der Kraftfahrzeuge^{10,11}

Die wesentlichen Emissionsquellen eines Kraftfahrzeugs sind Motor (Vergaser und Auspuff), Tankentlüftung und Fahrwerk (Reifen, Bremsen). Durch **Erosion von Reifen und Fahrbahn** werden im Straßenraum auch Feinpartikel freigesetzt. Derzeit wird versucht, quantitative Zusammenhänge zwischen Fahrzeug- und Fahrbahnart, Fahrmodus und Feinstaubemissionen herzustellen. Vergleiche zwischen gemessenen und aus Abgasemissionsfaktoren berechneten Feinstaub- und Rußkonzentrationen in Tunnels deuten darauf hin, dass ein Mehrfaches der Motor-Partikelemissionen durch Reifen- und Fahrbahnabrieb sowie durch Wiederaufwirbelung erzeugt wird¹². Vom Abrieb der Reifen (Pkw: ca. 0,03 - 0,1 g/km, Lkw: ca. 0,1 - 0,8 g/km)¹³ sind die Inhaltsstoffe Ruß und Zink und ggf. Cadmium von lufthygienischem Interesse; beim Bremsen und Kuppeln wurden von älteren **Reibbelägen** Asbestfasern freigesetzt. Heute werden Brems- und Kupplungsbeläge ohne Verwendung von Asbest hergestellt. Die davon ausgehenden Emissionen sind jedoch hinsichtlich des Gehaltes an toxischen Elementen (z.B. Blei, Kupfer, Antimon) unter Wirkungsaspekten weiter zu beobachten. Auch durch **Korrosion** können Metalle und Metallverbindungen wie Zink

⁶ 19. Verordnung zur Durchführung des BImSchG (19. BImSchV) -Chlor- und Bromverbindungen als Kraftstoffzusatz vom 17.01.1992, BGBl. I S. 75

⁷ 20. Verordnung zur Durchführung des BImSchG (20. BImSchV) - Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen beim Umfüllen und Lagern von Ottokraftstoffen vom 27.05.1998, BGBl. I S. 1174, zuletzt geändert am 21.08.2001, BGBl. I, S. 2180, 2213

⁸ 21. Verordnung zur Durchführung des BImSchG (21. BImSchV) - Begrenzung von Kohlenwasserstoffemissionen bei der Betankung von Kraftfahrzeugen vom 07.10.1992, BGBl. I S.1173

⁹ Erste Verordnung zur Änderung der 21. BImSchV, Entwurf i.d.F. des Beschlusses des Bundeskabinetts vom 21.11.2001

¹⁰ Robert Bosch GmbH, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 22. Aufl. VDI-Verlag Düsseldorf, 1995

¹¹ Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Benzin und Dieselantriebe, München 2001

¹² B. Brenner, P. Rabl, T. Wegehaupt, Tunnel-Immissionsmessungen zur Bewertung kfz-spezifischer Emissionen, Tätigkeitsbericht 1999, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg, 2000

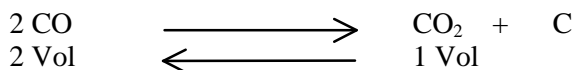
¹³ Techn. Universität Berlin, ISS-Fahrzeugtechnik, Quantifizierung des Reifenabriebs von Kraftfahrzeugen in Berlin. Studie im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie, Berlin, Feb. 1997

und Cadmium von Metalloberflächen oder Platin, Palladium und Rhodium aus Katalysatoren in die Umgebung gelangen (vgl. auch 3.3).

Die **Kraftstoffemissionen** durch Tankatmung und Verdunstung aus dem Vergaser betragen bei konventionellen Pkw mit Ottomotor ohne Abgasreinigung im Tagesdurchschnitt etwa 20 g/Kfz. Sie können entscheidend durch den Einbau von selbstreinigenden Aktivkohlefiltern verringert werden. Solche Filter sind bei Fahrzeugen mit geregelter Katalysator meist vorhanden. Zur Zeit muss die Kraftstoff-Verdunstungsmenge eines Fahrzeugs mit vorgewärmtem und zu 40 % gefülltem Tank pro Testzyklus und nachfolgendem einstündigem Abstellen unter 2 g liegen (Shed-Test). Die Verdunstungsemissionen von Diesel-Kfz sind wegen der geringeren Flüchtigkeit des Kraftstoffes von untergeordneter Bedeutung.

Die **Zusammensetzung der Motorabgase** unterscheidet sich nach Motortyp (Ottomotor, Dieselmotor) und Fahrmodus sowie Kraftstoffart und -qualität. Sowohl Otto- als auch Dieselmotoren emittieren beim Betrieb Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x), organische Verbindungen (CH) und abhängig vom Schwefelgehalt des Treibstoffs Schwefeldioxid (SO₂). Die Komponente CH ist ein Gemisch aus mehreren hundert Stoffen. Von lufthygienischem Interesse sind insbesondere Aromaten, wie Benzol, Toluol, Xylol, und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie Aldehyde, wie Formaldehyd, Acetaldehyd, Acrolein und Benzaldehyd. Auffällige **Gerüche** weisen Abgase von Diesel- oder Zweitaktmotoren aufgrund ihrer spezifischen Zusammensetzung auf.

Verbrennungsmotoren stoßen außer gasförmigen Komponenten auch **Partikel** aus. Dabei sind die emittierten Massenströme von Ottomotoren eine bis drei Größenordnungen geringer als die von Dieselmotoren. Soweit Ottomotoren mit verbleitem Benzin betrieben wurden, enthielten die Partikel Blei, wohingegen Dieselmotoren Rußpartikel emittieren. Die Bleiemissionen im Abgas von Ottomotoren sind seit der steuerlichen Begünstigung bleifreien Benzins (1985) und endlich, seit verbleites Benzin nicht mehr im Handel ist (1998), nahezu bedeutungslos geworden. Jedoch stellen die Rußemissionen der Diesel-Kfz wegen ihres vergleichsweise hohen kanzerogenen Wirkungspotentials vor allem in Innerortsbereichen ein ernstzunehmendes Problem dar. Die Rußbildung bei Dieselmotoren ist folgendermaßen zu erklären: Da der Kraftstoff bei hohem Druck flüssig eingespritzt wird und im Brennraum trotz Luftüberschusses in Tröpfchenform vorliegt, gibt es während der ganzen Verbrennung, die von der Oberfläche der Tröpfchen zu ihrem Kern erfolgt, im Innern stets eine „fette“ Gemischzone mit Sauerstoffmangel, die zum Schluss zu einem Partikel führt, das aus Kohlenstoff, einem Rest unverbrannter Kohlenwasserstoffe und Asche aus Kraftstoffadditiven besteht. Eine Begünstigung der Kohlenstoffbildung im Dieselmotor ist auch durch die Boudouard-Gleichgewichtsreaktion denkbar, welche bei Druckeinwirkung eine Begünstigung der Reaktionsprodukte geringeren Volumens nach dem Massenwirkungsgesetz beschreibt:



Die Partikel aus Dieselmotoren haben überwiegend einen aerodynamischen Durchmesser von 0,1-0,2 µm und sind durchwegs lungengängig.

Die Emissionen der **Stickstoffoxide (NO_x)**, die zum geringeren Teil durch Oxidation von Stickstoffverbindungen aus dem Kraftstoff, hauptsächlich aber durch Reaktion von Luft-Stickstoff und Luft-Sauerstoff bei hohen Temperaturen in den Brennkammern des Motors entstehen, steigen mit wachsender Motordrehzahl. Im normalen Arbeitsbereich des Ottomotors ist bei stöchiometrischem Luft-Kraftstoff-Verhältnis (Luftzahl λ = 1) die Verbrennungstemperatur und damit die NO_x-Bildungsrate am höchsten. Da Dieselmotoren im Gegensatz zu Ottomotoren mit Luftüberschuss betrieben werden und deshalb niedrigere Verbrennungstemperaturen aufweisen, emittieren sie bei vergleichbarer Leistung weniger CO, CH und NO_x als Ottomotoren ohne geregelten Katalysator. Der Sachverhalt geht aus Abb. 1 qualitativ hervor. Da mit erhöhter Motordrehzahl die Verbrennungstemperatur und der Verbrennungsdruck steigen, verringern sich dabei anteilmäßig die Emissionen der nur teilweise "verbrannten" Komponenten **Kohlenmonoxid** und **Kohlenwasserstoffe**, die bevorzugt durch unvollständige Verbrennung des Gemisches und durch Flammenlöschung an Zylinder- und Kolbenwandzonen entstehen.

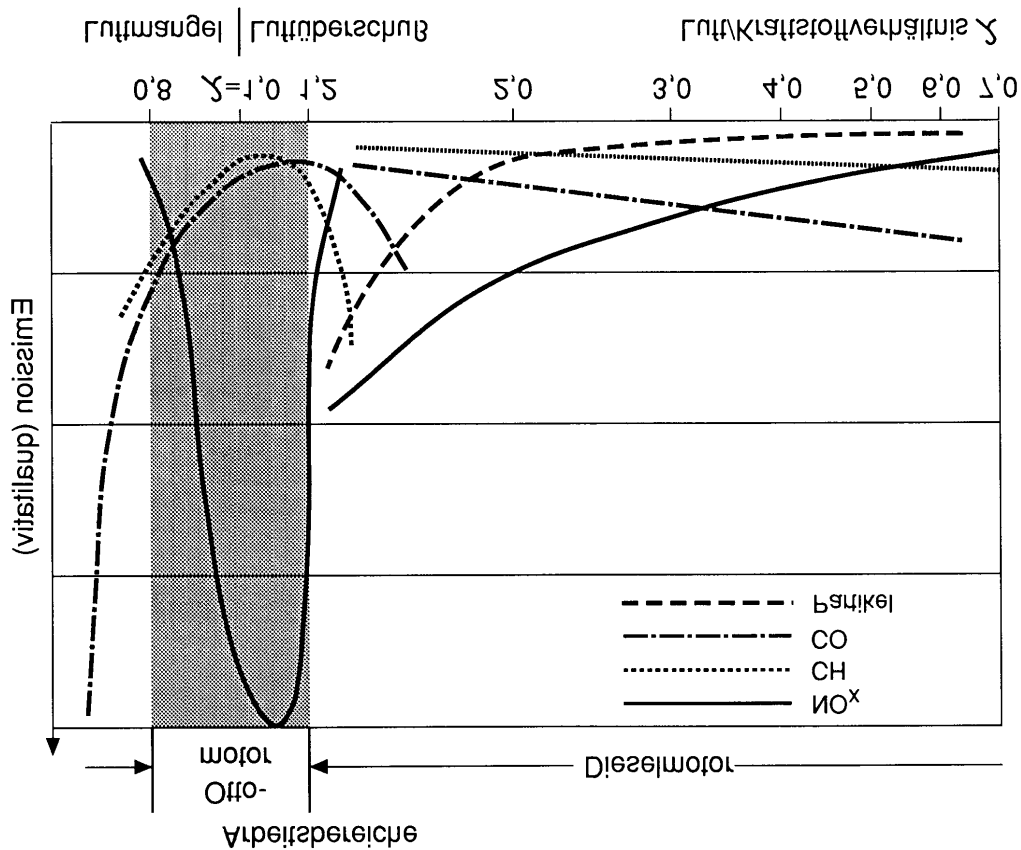
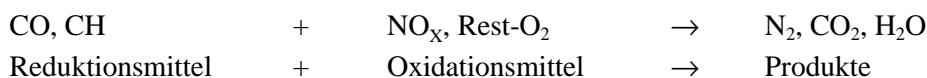


Abb. 1: Vergleich der NO_x -, CH-, Partikel- und CO-Emissionen von Otto- und Dieselmotor

Bei sehr hohen Motordrehzahlen und Fahrgeschwindigkeiten im Vollastbereich steigen allerdings wegen der häufig damit verbundenen "fetteren" Einstellung des Luft-Kraftstoffgemisches bei Ottomotoren ("Vollast-Anreicherung") die CO- und CH-Emissionen ebenso wie der streckenbezogene Kraftstoffverbrauch wieder deutlich an. Bei Diesel-Motoren sind die NO_x - und Rußemissionen im Vollastbereich am höchsten (vgl. Abb. 1). Die Luft-Kraftstoff-Gemische bei **Motorrädern und Mopeds** sind im Allgemeinen mit Luftmangel (fett) eingestellt, so dass diese ein Mehrfaches an CO und CH, jedoch weniger NO_x emittieren als Pkw. Bei Zweitaktfahrzeugen sind die Emissionen maßgeblich durch unverbrannte Kohlenwasserstoffe aus der Gemischschmierung und aus Spülverlusten bestimmt, welche auch die typischen Geruchseinwirkungen verursachen.

2.4 Abgasreinigungstechnik^{14,15}

Eine erhebliche Minderung der Abgaskomponenten des Ottomotors wird durch den Einbau eines **Dreiwegkatalysators** im Abgaskanal erreicht. Am Katalysator, dessen wirksame Schicht Platin- Palladium- bzw. Rhodiummetall in feiner Verteilung auf einer großen Oberfläche enthält, werden bei $\lambda=1$ CO zu Kohlendioxid (CO_2), CH zu CO_2 und Wasser (H_2O) oxidiert und NO_x zu Stickstoff (N_2) reduziert:



Für seine optimale Wirksamkeit ist jedoch eine exakte Regelung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses (λ) im Vergaser oder im Einspritzsystem über eine Sauerstoffmesssonde (λ -Sonde), die sich im Abgaskanal befindet, notwendig. Bei Luftüberschuss steigen sonst die NO_x -Emissionen zunächst stark an, bei Kraftstoffüberschuss der CO- und CH-Ausstoß. Bedingt durch Regelabweichungen, v.a. in den fetten Gemischbereich bei der Warmlaufphase, kann es auf dem Katalysator auch zur Bildung von Distickstoffoxid (N_2O , Lachgas), Ammoniak (NH_3) Cyanwasserstoff (HCN , Blausäure) und Schwefelwasserstoff (H_2S) kommen.

¹⁴ Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg: Ermittlung von Art und Umfang der Partikelemissionen von Dieselfahrzeugen, Bericht, Karlsruhe 12/1999

¹⁵ Verschiedene Herstellerangaben

Die Abgasreinigungsleistung des geregelten 3-Wege-Katalysators liegt nach Angaben von Motorherstellern im Allgemeinen bei 90 % für CO und CH und zwischen 85 % und 90 % bei Stickstoffoxiden. Der Katalysator beginnt bei etwa 300 °C wirksam zu werden und arbeitet bei etwa 500 °C optimal. Die volle Reinigungsleistung erreichen Katalysatoren unter den Bedingungen des neuen Europatests (MVEG-Test) nach etwa 3-5 Minuten. Bis dahin werden aber 80 % bis 90 % der Schadstoffe des gesamten Testlaufes von ca. 20 Minuten emittiert. Zur Erreichung der Euro-3-Grenzwerte müssen diese Startemissionen mit konstruktiven Mitteln, z.B. durch einen motornahen Vorkatalysator oder elektrische Vorheizung des Katalysators und der λ -Sonde verringert werden. Die Kaltstartemissionen können auch durch Vorschalten von CH-Adsorbieren vor den eigentlichen Katalysator vermindert werden. CH-Adsorber bestehen aus hochporösen Silikatmineralien (Zeolithe), an denen im kalten Zustand unverbrannte Kraftstoffreste adsorbiert werden. Bei Erreichen der Arbeitstemperatur des Katalysators werden diese wieder desorbiert und am Katalysator verbrannt.

Zur Erreichung der Euro-3-Norm ist ein **On-Board-Diagnose-System** vorgeschrieben. Derzeit kann dies in einer zweiten λ -Sonde bestehen, welche hinter dem Katalysator im Abgaskanal montiert ist. Diese misst über die O₂-Konzentration die Speicherfähigkeit des Katalysators für Sauerstoff. Nimmt diese ab, so vermindert sich auch seine Aktivität. Bei identischen Sauerstoffkonzentrationen vor und hinter dem Katalysator ist der Katalysator verbraucht. An der Verbesserung von komponentenspezifischen Abgassonden, z.B. zur Messung der Stickstoffoxide zur Kontrolle der Katalysatorwirksamkeit wird noch gearbeitet.

Bei der Zulassung neuer Fahrzeugtypen ist vom Hersteller ein **Funktionsnachweis** der Abgasreinigungssysteme über 80.000 km (bzw. 100.000 km, ab Euro 4) unter definierten Bedingungen vorzulegen. Wie sich die Emission aber in der Praxis verhält, kann danach nur eingeschränkt beurteilt werden. Unter extremen Bedingungen, d.h. bei häufigen und lang andauernden Vollgasfahrten ist es möglich, einen Katalysator schon nach verhältnismäßig kurzer Zeit „durchzubrennen“. Eine thermische Zerstörung des Katalysators erfolgt auch recht schnell beim Ausfall einer Zündkerze oder bei fehlerhafter Lambda-Regelung zu überfettetem Gemisch. Nach einer im Auftrag des Umweltbundesamtes im Jahr 1992 vorgenommenen Untersuchung des RW-TÜV an 30 verschiedenen Typen (131 Gebrauchtfahrzeuge mit geregelter Katalysator) wiesen 16 Typen (61 Fahrzeuge) Überschreitungen von mindestens einem Grenzwert des Zulassungstests auf. Bei 11 Typen lagen wartungs- oder fertigungsspezifische Mängel vor. In der Regel war eine Nachbesserung mit relativ einfachen Maßnahmen möglich. Drei der Katalysatordefekte beruhten auf Betrieb mit verbleitem Benzin¹⁶. Bei einem 1996/97 durchgeführten Feldversuch an über 100 Privat-Pkw mit Erstzulassungen ab 1991 waren bei etwa einem Drittel der Fahrzeuge die ursprünglichen Abgaswerte nicht mehr eingehalten¹⁷. Dabei erwiesen sich Konstruktionsmängel und unzureichende oder falsche Wartungsvorschriften als die Hauptursachen. Diesel-Pkw halten nach dem Ergebnis einer parallel geführten Studie die geforderten Abgaswerte besser ein¹⁸.

Weitere Möglichkeiten zur Emissionsminderung von Otto-Kfz ergeben sich nach Abb. 1 durch Betrieb mit Luftüberschuss, d.h. im „mageren“ Bereich. Dabei sind jedoch konstruktive Vorkehrungen für einen „runden“ Motorlauf zu treffen. Ein neueres **Magermotor**-Konzept wird beim Otto-Direkteinspritzer (DI) verfolgt, welches Kraftstoffeinsparungen bis 20 % gegenüber herkömmlichen Ottomotoren verspricht. Hier erfolgt die Gemischbildung wie beim Dieselmotor in der Brennkammer. Die Menge der Brennluft wird durch variable Ventilsteuerung lastabhängig geregelt. Es muss aber z.B. durch entsprechende Formung der Einlasskanäle dafür gesorgt werden, dass das Luft-Kraftstoff-Gemisch bei allen Lastzuständen gleichmäßig zündet. Da der Motor mit Luftüberschuss betrieben wird, kann zur Abgasnachbehandlung kein geregelter Katalysator eingesetzt werden. Zur Einhaltung der Euro-4-Abgaswerte werden daher zur Zeit kombinierte Konzepte erprobt, welche aus einem **NO_x-Speicherkatalysator** zur reversiblen NO_x-Absorption und katalytischen Oxidation von CO und CH (s.u.) bestehen. Zu Emissionsproblemen kann es beim Otto-DI im Niedriglastbereich kommen, wenn die Abgastemperatur unter die Betriebstemperatur des Katalysators sinkt, sowie bei hohen Drehzahlen, wo es durch unvollständige Vermischung des eingespritzten Kraftstoffs zur Bildung von Ruß kommen kann. Um dies zu vermeiden, wird das Brennverfahren im Volllastbereich z.B. über ein aufwendiges Steuerverfahren vom Direkteinspritzverfahren wieder auf konventionelle Drosselklappenregelung und Saughubeinspritzung umgestellt.

¹⁶ Umweltbundesamt, Feldüberwachung für Kraftfahrzeuge im Verkehr. UBA-Jahresbericht 1995, Berlin 1996

¹⁷ Dresen-Rausch, J. (RW-TÜV), „Ermittlung gesetzlich limitierter und nicht limitierter Schadstoffe von Fahrzeugen im Verkehr“ Umweltbundesamt, Berlin, 1997

¹⁸ Dresen-Rausch, J. (RW-TÜV), „Feldüberwachung von Diesel-Pkw“, Umweltbundesamt, Berlin, 1998

Motorräder, die mit Ein- oder Zweizylindermotoren ausgestattet sind, werden mit Luftunterschuss betrieben, wodurch verhältnismäßig wenig Stickstoffoxid-Emissionen entstehen. Die gegenüber Pkw vergleichsweise sehr hohen CO- und CH-Emissionen lassen sich mit Hilfe eines unregulierten Abgaskatalysators vermindern, dem über einen Bypass Nebenluft zugeführt wird („**Oxikat**“). Es sind allerdings auch Motorräder mit geregelter Katalysator im Handel. Diese sind aber meist mit Drei- bis Vierzylindermotoren ausgestattet.

Beim **Dieselmotor** bewirkt eine Verdichtung der Verbrennungsluft mit einer vom Abgasstrom angetriebenen Turbine ("Turbolader") eine Verringerung sämtlicher Schadstoffkomponenten im Abgas. Allerdings würde die durch die Kompression bewirkte Erwärmung der Ladeluft zu einem Anstieg der NO_x-Emissionen führen, so dass sie bei leistungsfähigeren Motoren u. a. auch deswegen gekühlt werden muss. Eine feine und gleichmäßige Verteilung des eingespritzten Kraftstoffs in der Brennkammer wirkt sich günstig für den Verbrennungsablauf und damit für die Minderung von CO-, CH- und Rußemissionen aus und trägt durch Senkung von Temperaturspitzen in gewissem Umfang auch zur Verringerung von NO_x-Emissionen bei. Deshalb ist die Geometrie von Brennraum und Einspritznebel nicht selten kugelförmig gestaltet. Auch die Erhöhung des Einspritzdruckes von früher 600-700 bar auf Werte über 1000 bar, elektronisch geregelte Einspritzmengen und -zeitpunkte, die "Common-Rail"- und die Pumpe-Düse-Einspritztechnik bewirken eine leichte Verringerung der NO_x- und eine erhebliche Reduzierung der CH-, CO- und Partikelemissionen. Eine weitere technische Möglichkeit zur Minderung von NO_x, CO und CH im Dieselabgas beruht auf der Rückführung eines Teils der Abgase (max. 15 – 20 %) in die Verbrennungsluft des Motors (**Abgasrückführung**). Dabei erfolgt durch die Verringerung der Verbrennungstemperatur eine bis zu 60 %-ige NO_x-Minderung, durch die teilweise Nachverbrennung auch ein Rückgang der CO- und CH-Emissionen. Allerdings steigen bei zu hohen Rückführungsraten die Partikel- und CH-Emissionsraten wieder an.

Kleinere Dieselmotoren (z.B. für Pkw) sind zur Emissionsminderung auch mit **Oxidationskatalysatoren** ausgestattet. Diese bewirken neben einer Minderung der gasförmigen CO- und CH-Emissionen eine Verringerung des Partikelgewichts durch Oxidation der an Partikel gebundenen Kohlenwasserstoffe. Eine Rußminderung erfolgt durch solche Oxidationskatalysatoren praktisch nicht. Durch den i.A. höheren Schwefelgehalt des Dieselkraftstoffs ist die Standzeit von Diesel-Oxikats geringer als die von Ottomotorkatalysatoren. Zur Partikelabscheidung aus dem Abgas größerer Dieselmotoren wurden selbstreinigende Filteranlagen (**Rußfilter**) erprobt; sie sind bei Lkw, Bussen und Kommunalfahrzeugen teilweise im Einsatz¹⁹. Das Filterkonzept wird für Serienfahrzeuge derzeit mit geänderten Randbedingungen neu untersucht. Hierbei werden auch katalytisch wirkende cer- oder eisenhaltige Kraftstoffzusätze untersucht, welche ein selbständiges Abbrennen des Rußes auf dem Filter bewirken. Nicht ganz unproblematisch stellt sich in diesem Zusammenhang die Emission von feinverteilten Katalysatorpartikeln (Eisenoxide, Ceroxide) dar. Derzeit (März 2002) sind mehrere Pkw-Typen mit serienmäßiger Rußfilterausstattung auf dem Markt (Peugeot). Dabei handelt es sich um einen kombinierten Oxikat und nachgeschaltetem Siliziumcarbidgefilter mit thermisch-/katalytischer Regeneration (Cer). Die Filterstandzeit wird vom Hersteller mit 80.000 km angegeben. Danach muss eine Überholung der Einheit erfolgen.

Bereits häufig im Einsatz bei der Dieselabgasreinigung von Linienbussen ist der **CRT-Rußfilter** (Continuous Regenerating Trap), der aus einer Kombination von Oxidationskatalysator und nachgeschaltetem Keramik- oder Sintermetallfilter besteht²⁰. Damit können CO-, CH- und Partikelemissionen zu etwa 90 % vermindert werden. Als Oxidationsmittel dient NO₂, das auf der Katalysatoroberfläche aus NO entsteht. CRT-Filter benötigen aber besonders schwefelarmen Dieselkraftstoff ($\leq 0,001$ Gew. % Schwefel). Die NO_x-Emissionen werden bei der CRT-Technik allerdings in der Gesamtmenge nur geringfügig vermindert, und werden ähnlich wie bei Ottomotoren, die mit G-Kat ausgerüstet sind, überwiegend als Stickstoffdioxid (NO₂) emittiert.

Eine Abgasnachbehandlung auf **Denox-Katalysatoren** zur NO_x-Minderung ist zur Einhaltung der Euro-4-Abgaswerte an Dieselaggregaten von Langstrecken-Transport-Lkw erprobt (SiNO_x-Verfahren). Die Stickstoffoxide werden dabei mit Hilfe einer wässrigen Harnstofflösung am Vanadiumpentoxid-Kontakt in elementarem Stickstoff umgewandelt. Ziel dieser Technik ist es, durch optimale Einspritzregelung die CO-, CH- und Partikelemissionen minimal zu halten und die wegen des hohen Wirkungsgrades und der hohen Verbrennungstemperatur allerdings beträchtlichen NO_x-Emissionen durch Selektive Katalytische Redukti-

¹⁹ SUVAPRO, Geprüfte Partikelfilter-Systeme für Dieselmotoren (Filterliste), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Dokumentation 01.08.1999, Bern

²⁰ Umweltbundesamt, Stellungnahme zum CRT-Rußfilter, Berlin, 21.08.1996

on (SCR) zu vermindern. Voraussetzung ist dabei auch eine Abgastemperatur von etwa 400 °C. Das System wird derzeit für Nutzfahrzeuge im Kurzstreckeneinsatz unter Vorschaltung eines Oxidationskatalysators getestet. Allerdings muss dann zur optimalen Wirksamkeit der verwendeten Katalysatoren schwefelfreier Dieseldieselkraftstoff eingesetzt werden.

Eine Kombination der CRT-Technik mit der SCR-Technik, bei der dem katalytischen Rußfilter ein Denox-Katalysator nachgeschaltet ist, welcher mit Ammoniumcarbonat oder -carbamat betrieben wird (**SCRT-Technik**), befindet sich derzeit in der Felderprobung. Neben der CRT-spezifischen Partikelminderung können dadurch die NO_x-Emissionen zwischen 60 und 80 % gemindert werden.

Versuche zur NO_x-Emissionsminderung bei Dieselmotoren oder im Magerbereich betriebenen Ottomotoren (z.B. Direkteinspritzer) laufen derzeit auch mit sog. „**NO_x-Speicher-katalysatoren**“. Diese enthalten neben der normalen Edelmetallkomponente zur Oxidation von CO und CH Erdalkalicarbonat (z.B. Bariumcarbonat), das die unter den normalerweise mageren Betriebsbedingungen überwiegend zum NO₂ oxidierten Stickstoffoxide reversibel als Nitrat speichert. Durch kurzfristig fett eingestellte Betriebszustände wird das Nitrat zu elementarem Stickstoff (N₂) reduziert und die Trägersubstanz mit Abgas-Kohlendioxid wieder zum Carbonat regeneriert. Da die Umwandlungen auf diesem Katalysator in einem engen Temperaturfenster (250-400°C) ablaufen und wegen der verschiedenen Gemischzustände beim Fahrzeugbetrieb ist für die Steuerung eine Temperatur- und eine Lambdasonde erforderlich. Durch die zur Regeneration zeitweise erforderliche Anfeuchtung des Luft/Kraftstoffgemischs ergibt sich ein geringfügiger Kraftstoffmehrerverbrauch (ca. 2 %). Auch der NO_x-Speicher-katalysator kann nur mit praktisch schwefelfreiem Kraftstoff betrieben werden.

Neuere Antriebskonzepte, die derzeit entwickelt werden, beruhen auf teilweisem oder vollständigem Ersatz des Verbrennungsmotors durch Elektromotoren. Sogenannte „Hybrid“-Fahrzeuge werden wahlweise durch Elektro- oder Verbrennungsmotor angetrieben. Dabei gibt es Konstruktionen, bei denen ein auf optimaler Leistungsstufe arbeitender Verbrennungsmotor einen Generator betreibt und mit Hilfe der gewonnenen elektrischen Energie den Fahrzeugantrieb über eine Pufferbatterie elektrisch bewerkstelligt. Eine andere Variante des Hybridantriebs hat am Getriebe sowohl einen Verbrennungsmotor als auch einen Elektromotor angeflanscht, was unter Verwendung einer ausreichend dimensionierten Batterie einen Wechselbetrieb des Verbrennungs- oder des Elektromotors ermöglicht. Energetisch günstiger ist der Elektroantrieb vor allem dann, wenn die Achsen direkt, d. h. ohne Zwischenschaltung eines Schaltgetriebes angetrieben werden. Dieses Konzept wird beim „Brennstoffzellen-Auto“ angewandt, bei dem in Umkehrung des Elektrolysevorgangs durch „kalte“ Verbrennung von Wasserstoff elektrische Energie gewonnen und in motorische umgewandelt wird.

Der Anteil der in der Bundesrepublik zugelassenen Pkw mit Dieselantrieb lag am 01.01.2002 bei 15,7 Prozent. Der Pkw-Anteil, der den derzeit höchsten Anforderungen "D3/D4/EURO3/EURO4" genügt, lag bei 31,5 %. 96,1 Prozent aller Personenkraftwagen waren als „schadstoffarm“ registriert²¹.

2.5 Einflüsse des Kraftstoffs

Emissionen im Straßenverkehr werden auch durch die Qualität des Kraftstoffs beeinflusst. Ottomotorkraftstoff (Benzin) enthält derzeit je nach Sorte etwa 0,7-0,9 Vol.% Benzol, 30-50 Vol.% Alkylaromaten, unterschiedliche Anteile gesättigter (Alkane) und ungesättigter (Alkene) Kohlenwasserstoffe sowie sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffverbindungen (Alkohole, Ether) bis zu einem Gesamt-O-Gehalt von 2,7 Gew. % (entsprechend einem Maximalgehalt von ca. 5 % Methanol oder 15 % Methyl-t-butylether). Die **Benzol**-emissionen von Kfz sind vor allem vom Benzol- und Alkylaromatengehalt des Kraftstoffs abhängig. Normalbenzin enthält im Allgemeinen die niedrigsten Aromatenanteile (um 30 Vol.%). Die Benzolemissionen bei Betrieb mit Normalbenzin mit < 1 Vol.% Benzol und ca. 30 % Aromaten liegen bei gleichem Streckenverbrauch eines Kfz derzeit ca. 8 bis 10 % unter denen bei Super- und Super-Plus-Betrieb mit < 1 Vol % Benzol und ca. 40 % Aromaten.

Höhere Anteile von Alkohol und Methyl-t-butylether verringern zwar die CO- und Benzolemissionen, können aber zu vermehrtem Aldehyd-Ausstoß führen.

Eine Verringerung des **Schwefel**anteils im Kraftstoff bewirkt weniger SO₂- sowie partikelgebundene Sulfatemissionen. Die Schwefelgehalte von Benzin liegen derzeit unter 150 ppm (0,015 Gew.%) und bei Dieseldieselkraftstoff unter 350 ppm (0,035 Gew.%). Erhöhte Konzentrationen schwefelhaltiger Verbindungen beeinträchtigen die Wirksamkeit von Abgaskatalysatoren. (Aus demselben Grund dürfen Ottomotoren mit

²¹ Kraftfahrtbundesamt, Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern im Januar 2002, Flensburg, 2002

Katalysator auch nicht mit bleihaltigem Benzin betrieben werden.) Versuche i.R. des European Programme on Emissions, Fuels and Engine Technologies²² zeigten bei Ottomotor-Kfz, die mit Kraftstoff mit einem Schwefelgehalt von 18 ppm anstelle von 382 ppm getestet wurden, im innerstädtischen Teil des Europa-zyklus Minderungen von 9 % Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe und 10 % Stickstoffoxide, im außerstädtischen sogar solche von 43 % Kohlenwasserstoffe, 52 % Kohlenmonoxid und 20 % Stickstoffoxide. Zur Einhaltung der Euro-4 Abgaswerte sind wegen der empfindlicheren Katalysatormaterialien Kraftstoffe mit maximal 50 ppm, besser 10 ppm Schwefelgehalt erforderlich. Seit 01.11.2001 bietet die Mineralölwirtschaft i.R. einer freiwilligen Vereinbarung die Benzinsorte „Super-Plus“ schwefelfrei, d.h. mit ≤ 10 ppm Schwefel an (vgl. auch Ziffer 2.2).

Eine Erhöhung der **Cetanzahl** (Zündwilligkeit) des Dieselkraftstoffs führt zu einer Senkung der CO-, CH-, NO_x-, Partikel- und Rußemissionen.

Durch Verwendung einer **Diesel-Wasser-Emulsion** mit bis zu etwa 15 % Wasser (z.B. „Aquazole“ der Fa. Elf-Aquitaine) lassen sich durch die Herabsetzung der Verbrennungstemperatur die NO_x-Emissionen vermindern (15-30 %). Die durch das Wasser bewirkte feinere Zerstäubung der Kraftstofftröpfchen in der Brennkammer führt auch zu geringeren Ruß- und Partikelemissionen (30-80 %). Probleme könnte die Diesel-Wasseremulsion beim längeren Lagern (Entmischung) und bei niedrigen Umgebungstemperaturen (Einfrieren) bereiten. Bei einem 6-monatigen Großversuch an 15 Bussen der Berliner Verkehrsgesellschaft (BVG) zur Eignung von Aquazole wurden im Abgas Minderungen der Rauchtrübung um 40 % und NO_x-Minderungen um 15 % festgestellt. Die Gesamtpartikelemissionen waren bei Aquazole-Betrieb geringfügig gegenüber dem Betrieb mit regulärem Dieselkraftstoff erhöht, was auf erhöhten Anteil unverbrannter Kohlenwasserstoffe und wasserlöslicher Anteile zurückgeführt werden konnte. Die unlöslichen Partikelemissionen (Ruß, Aschen) waren beim Aquazolebetrieb 28 % geringer²³. Es empfiehlt sich daher, Wasseremulsionskraftstoff in Verbindung mit einem Oxidationskatalysator einzusetzen.

Ein mit **Erdgas (CNG)** betriebener Pkw mit G-Kat emittiert gegenüber Benzinbetrieb im MVEG-Zyklus weniger als ein Fünftel CO und weniger als die Hälfte NO_x²⁴. Beim Betrieb mit **Flüssiggas (LPG)** liegen die Emissionsminderungen bei vergleichbaren Werten. Die Verwendung eines Erdgasmotors mit G-Kat anstelle eines Euro 2-Dieselmotors (z.B. in Bussen oder Kommunalfahrzeugen) lässt bis 75 % weniger CO- und praktisch keine Partikelemissionen erwarten. Die bei Erdgas zu etwa 90 % aus Methan bestehenden Kohlenwasserstoffemissionen lassen sich mit Hilfe eines methanspezifischen Katalysators auf Emissionswerte vermindern, die unter den Euro-3-Vorschlägen liegen. Obwohl ein mit CNG betriebener Busmotor im Prüfstandtest ca. 75 % weniger NO_x emittierte, konnten im realen Fahrbetrieb gegenüber einem Euro-2-Fahrzeug nur noch etwa 20 % NO_x-Minderung beobachtet werden, etwa vergleichbar einem mit SCR-Technik ausgestatteten Fahrzeug²⁵.

Der Ersatz von Dieselkraftstoff durch **Rapsölmethylester (RME)** bewirkt in der Regel eine Verminderung der Partikel-, CO-, CH- und der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffemissionen. Hingegen können die NO_x-Emissionen leicht erhöht sein²⁶. Darüber hinaus entstehen bei RME-Betrieb geruchsintensive Stoffe im Abgas²⁷. Abgesehen von NO_x lassen sich diese Emissionen mit Hilfe eines Oxidationskatalysators deutlich mindern, zumal RME auch niedrigere Schwefelgehalte als Dieselkraftstoff aufweist.

2.6 Sonstige Minderung von Kfz-Emissionen

2.6.1 Individuelle Möglichkeiten zur Emissionsminderung

Die Wahl eines verbrauchs- und emissionsarmen Fahrzeugs bietet die Möglichkeit für einen emissionsarmen Betrieb. Grundsätzlich emissionsmindernd ist kraftstoffsparendes Fahren, wie die Nutzung niedriger Drehzahlen, gleichmäßige, vorausschauende Fahrweise und Vermeidung starker Beschleunigungen. Bei Stillstand an Bahnübergängen oder Ampeln mit langen Haltephasen können Emissionsminderungen durch Motorabstellen bewirkt werden. Auf optimalen technischen (kraftstoffsparenden) Zustand des Fahrzeuges sollte geachtet werden. In Städten sollte grundsätzlich, d.h. auch mit Katalysatorfahrzeugen auf Kurzstre-

²² European Programme on Emissions, Fuels and Engine Technologies (EPEFE), Executive Summary. Hrsg. ACEA u. EUROPIA

²³ Stommel, P., Lepperhoff G., „Wasseremulsionskraftstoff: Eine Möglichkeit zur Verminderung dieselmotorischer Abgasemissionen; Kongress „CRT contra Erdgas? – Umweltfreundliche Omnibusantriebe“ der Berliner Verkehrsbetriebe; 9. und 10.9.1999

²⁴ TÜV Bayern Sachsen, Erdgasfahrzeuge, Verlag TÜV Bayern Sachsen, München, 1995

²⁵ TÜV Automotive GmbH, Emissionsvergleich ÖPNV auf der Basis realer Fahrbedingungen, München Juni 1999

²⁶ z.B. TÜV Automotive GmbH, Untersuchungen von Diesel-Pkw bei der bayerischen Polizei, Zwischenbericht, Nov. 2001

²⁷ TÜV Bayern Holding AG, Biodiesel für Fahrzeuge, München, 1997

ckenfahrten (< 3 km) möglichst verzichtet werden, da hierbei der Katalysator in der Regel nicht die für die volle Reinigungswirkung erforderliche Betriebstemperatur erreicht. In Tabelle 4 sind die wichtigsten Maßnahmen zur Luftreinhaltung beim Autofahren zusammengefasst.

Tabelle 4: Maßnahmen zur Luftreinhaltung beim Autofahren

1. *Vermeidung unnötiger Fahrten:*
Möglichst keine Kurzstrecken (< 3 km) mit dem Auto fahren, sondern alternative Verkehrsmittel benutzen (FüÙe, Fahrrad, ÖPN-Verkehrsmittel, Eisenbahn)
Fahrgemeinschaften gründen
2. *Technischer Zustand und Betrieb des Autos:*
Verbrauchsarmes Kfz mit optimalem Abgasstandard
Schwefelarm tanken
Regelmäßige Motorwartung
Reifendruck überprüfen (nicht zu niedrig, eher höher, wie beim vollbeladenen Auto)
Winter- und M&S-Reifen nicht ganzjährig fahren
Unnötigen Dach- oder Heckgepäckträger abnehmen
3. *Kraftstoffsparende Fahrweise:*
Motorstart ohne Gaspedal
Nach dem Starten gleich losfahren, kein Warmlaufenlassen im Stand
Mit Vollgas bis zur optimalen (nicht höchsten) Drehzahl beschleunigen, frühzeitig schalten
Hohe Drehzahlen vermeiden (möglichst ≤ 2000 U/min), z.B. 5. Gang bei 50 km/h möglich
Elektrische Verbraucher sparsam einsetzen
Gleichmäßig fahren
Vor der Ampel: Schubabschaltung nutzen (Ausrollen im höchsten Gang, nicht während des Rollens auskuppeln, Leerlauf vermeiden)
Auch bei kurzer Wartezeit (> 5 sec): Motor aus

2.6.2 Emissionsminderung durch Verkehrslenkung und Verkehrsplanung

Auf Autobahnen und BundesstraÙen sind Emissionsminderungen durch allgemeine **Geschwindigkeitsbegrenzungen** möglich. In der Tabelle 5 sind auf das Jahr 1999 bezogene Minderungspotentiale einer Kfz-Flotte für die Leitschadstoffkomponenten, die CO₂-Emissionen und den Kraftstoffverbrauch zusammengefasst, die sich durch Vergleich der entsprechenden Emissionsfaktoren aus dem "Handbuch der Emissionsfaktoren 1980-2020"²⁸ ergeben. Ähnliche Ergebnisse konnten an Autobahnabschnitten gemessen werden, an denen eine Geschwindigkeitsregelung durch **automatische Verkehrsleitsysteme** erfolgte²⁹. Wesentlich höher können individuelle Emissions- und Verbrauchsminderungen bei langsamerer und gleichmäßigerer Fahrweise ausfallen. So beträgt die Kraftstoffeinsparung und NO_x-Minderung eines Euro-2-Mittelklasse-Pkw mit Ottomotor bei Tempo 100 auf der Autobahn 27 % bzw. 47 %, bei Tempo 80 auf einer Bundesstraße 19 % bzw. 32 % gegenüber der herkömmlichen Fahrweise.

Auch auf InnerortsstraÙen kommen Verringerungen von Kfz-Emissionen durch **verkehrslenkende Maßnahmen** in Betracht. Insbesondere durch stauvermeidende Ampelkoordinierung und Vergleichmäßigung der Fahrgeschwindigkeit, z.B. durch Einrichtung von "Grüne-Welle"-Strecken oder von Verkehrsleit- und -informationssystemen können CO- und CH-Emissionen sowie der Kraftstoffverbrauch der Kfz deutlich vermindert werden. Solche Maßnahmen können allerdings auch die Attraktivität einer Straße für Kraftfahrzeuge erhöhen, so dass die Emissionsminderung an den einzelnen Fahrzeugen durch erhöhtes Verkehrsaufkommen wieder kompensiert wird³⁰.

²⁸ INFRAS AG, Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 1980-2020, Version 1.2, Hrsg. Umweltbundesamt, Berlin 1998

²⁹ B. Brenner, R. Borgmann, C. Hammerl, P. Rabl, "Immissionsmessungen an einer Bundesautobahn in Verbindung mit der Errichtung eines Verkehrsleitsystems. Bayer. Landesamt für Umweltschutz, München 1998

³⁰ Dorsch Consult GmbH, Lufthygienische Wirksamkeit möglicher verkehrlicher Maßnahmen im Vollzug des § 40 (2) BImSchG. Gutachten im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen. Materialien Nr. 122, München 1996

Tabelle 5: Flottenbezogene Emissions- und Verbrauchsminderung bei Geschwindigkeitsbegrenzungen
(Berechnet mit Emissionsdaten des Bezugsjahres 2002; 82 % Pkw 9 % leichte Nfz, 8 % schwere Nfz,
1 % Krafträder; ebene, gerade Straße)

Komponente	Autobahn (130 km/h)		Bundesstraße (105 km/h)
	Beschränkung auf 120 km/h	Beschränkung auf 100 km/h	Beschränkung auf 80 km/h
Stickstoffoxide	-7 %	-14 %	-11 %
Partikel (Ruß)	-4 %	-11 %	-14 %
Benzol	-15 %	-25 %	-11 %
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	-9 %	-15 %	-5 %
Kohlendioxid	-7 %	-15 %	-13 %
Kraftstoffverbrauch	-7 %	-15 %	-13 %

Verringerungen des NO_x-Ausstoßes durch verminderte Motorleistung können auch durch die Einführung von 30 km-Zonen in Wohn- und Quartierstraßen erreicht werden. Da aber CO- und CH-Emissionen sowie der Kraftstoffverbrauch stärker von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen abhängig sind, ist bei der Auswahl der Maßnahmen darauf zu achten, dass eine gleichmäßige, niedertourige Fahrweise ermöglicht wird^{31,32}. Bei einem Vergleich unter realen Fahrbedingungen erwiesen sich die Partikelemissionen eines Diesel-Pkw und eines Busses (jeweils Euro 2) bei Tempo 30 um bis zu 50 % bzw. 70 % gegenüber denen bei Tempo 50 vermindert³³.

Generell emissionsminderndes Potential weisen auch **verkehrsplanerische Maßnahmen** auf, die zur Verringerung des nicht notwendigen motorisierten Individualverkehrs beitragen. Zur Vermeidung von Durchgangsverkehr in schützenswerten Innerortsbereichen können Umgehungsstraßen dienen. Meist verursacht aber der innerörtliche Ziel- und Quellverkehr den Hauptanteil der Immissionsbelastungen. Dabei bleiben die fahrzeuginternen Emissionsminderungseinrichtungen (G-Kat) wegen der großenteils kurzen Fahrstrecken bei Fahrzeugen, die schlechter als Euro 3 einzustufen sind, teilweise unwirksam, was auch den Erfolg von Benutzervorteilen (z.B. Konzept: „ohne Kat nicht in die Stadt“) infrage stellt. Eine effektive Minderung ist in Ortskernen und Wohnvierteln vor dem Erlass von Verkehrsverboten durch geeignete **Parkraumbewirtschaftung** möglich, die z.B. in verkehrsberuhigten Zonen die verfügbaren Parkplätze einschränkt, die Gebühren in Parkzonen zu Gunsten von Anwohnern und Langzeitparkern anpasst und kleinräumig differenzierte aber flächendeckende Anwohnerparkzonen ausweist. Im Gegenzug sind ausreichend verfügbare öffentliche Verkehrsmittel in Verbindung mit aufnahmefähigen Park & Ride-Angeboten sowie attraktive Fuß- und Radwege in Wohn-, Einkaufs- und Arbeitsbereichen anzubieten. Untersuchungen zu diesem Thema weisen stets darauf hin, dass zur wirksamen Emissionsminderung meist nur **koordinierte Verkehrskonzepte** zielführend sind, die sich gegenseitig ergänzen, unterstützen und nach Möglichkeit verstärken³⁴.

³¹ Umweltbundesamt, Umweltauswirkungen von Geschwindigkeitsbeschränkungen, Berlin 1999

³² Planungsgemeinschaft Dr. W. Theine, Erfahrungen mit Tempo 30. UBA-Forschungsbericht 97-019, Hannover-Leipzig-Magdeburg-Potsdam / Berlin 1996

³³ TÜV Automotive GmbH, Emissionsvergleich bei Einführung verkehrlicher Maßnahmen, Zwischenber. Nov. 2001, Febr. 2002

³⁴ Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Emissionsmindernde Maßnahmen im Straßenverkehr. Karlsruhe 1996

3. Immissionen an Straßen

3.1 Rechtliche Grundlagen, Immissionswerte

Das **Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)**³⁵ lässt in § 40 Abs. 1 zeitliche **Verkehrsbeschränkungen oder -verbote** in ausgewiesenen Gebieten bei austauscharmen Wetterlagen zu, um ein Anwachsen schädlicher Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen zu vermeiden oder zu vermindern. Auslöskriterien für verkehrsbezogene Maßnahmen sind neben dem Vorliegen einer austauscharmen Wetterlage die Überschreitung bestimmter Konzentrationsschwellwerte für Kohlenmonoxid und Stickstoffdioxid, die in Smogverordnungen einzelner Bundesländer festgelegt sind. Wegen des allgemeinen Rückgangs der Luftschadstoff-Immissionen wurden in letzter Zeit die Smogverordnungen in immer mehr Bundesländern, u.a. auch in Bayern, außer Kraft gesetzt, so dass § 40 Abs. 1 BImSchG dort nicht mehr anwendbar ist. Allerdings ist im Rahmen einer Novelle des BImSchG eine Neufassung des § 40 Abs. 1 BImSchG vorgesehen, wo Verkehrsbeschränkungen auch zur Einhaltung von Immissionswerten möglich sein sollen.

Nach § 40 Abs. 2 Bundes-Immissionsschutzgesetz kann „die Straßenverkehrsbehörde den Kraftfahrzeugverkehr auf bestimmten Straßen und in bestimmten Gebieten unter Berücksichtigung der Verkehrsbedürfnisse und der städtebaulichen Belange nach Maßgabe der verkehrsrechtlichen Vorschriften beschränken oder verbieten, wenn die für den Immissionsschutz zuständige Behörde dies im Hinblick auf die örtlichen Verhältnisse für geboten hält, um schädliche Einwirkungen durch Luftverunreinigungen zu vermindern oder deren Entstehen zu vermeiden.“ Die Konzentrationswerte, deren Überschreitung eine Prüfung solcher Maßnahmen auslöst, sind in der 23. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 16.12.1996³⁶ für die Komponenten Stickstoffdioxid, Benzol und Ruß enthalten. Von Verkehrsverboten sollen u.a. Kraftfahrzeuge mit geringem Schadstoffausstoß (z.B. G-Kat-Kfz) und Fahrten zu besonderen Zwecken (z.B. ÖPNV, Arzt- und Krankenfahrten u.a.) ausgenommen sein. § 40 Abs. 2 BImSchG hat im Wesentlichen vorsorglichen Charakter.

Auch die **Straßenverkehrsordnung** lässt nach § 45 Verkehrsbeschränkungen oder -verbote „zum Schutz der Bevölkerung vor Lärm und Abgasen“ zu³⁷.

Immissionswerte für die überwiegend kfz-bedingten Immissionen von Blei und Stickstoffdioxid wurden neben solchen für Schwefeldioxid, Schwebstaub und Ozon nach der Umsetzung der einschlägigen EG-Richtlinien 82/884/EWG (betreffend einen Grenzwert für den Bleigehalt der Luft) und 85/203/EWG (über Luftqualitätsnormen für Stickstoffdioxid) in nationales Recht in die 22. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz aufgenommen³⁸. Allerdings sehen die Tochtrichtlinien zur Luftqualitätsrichtlinie 96/62/EG des Rates³⁹ wie z.B. die Richtlinie 1999/30/EG⁴⁰ und die Richtlinie 2000/69/EG⁴¹ eine teilweise Verschärfung dieser Immissionswerte vor. Diese werden im Rahmen der Novellierung der 22. BImSchV in deutsches Recht umgesetzt.

Eine Zusammenstellung derzeit rechtsverbindlicher und vorgesehener Kfz-bezogener Immissions- und Konzentrationswerte findet sich in Tabelle 6.

³⁵ Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) i.d.F. der Bek. vom 14.05.1990, BGBl I S. 880, z.g. durch Gesetz vom 09.09.2001, BGBl. I S. 2331

³⁶ 23. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Verordnung über die Festlegung von Konzentrationswerten - 23. BImSchV) vom 16.12.1996, BGBl. I S.1962

³⁷ Straßenverkehrs-Ordnung - StVO - vom 16.11.1970, BGBl. I S. 3783, z. g. am 14.12.2001, BGBl. I S. 3783

³⁸ 22. Verordnung zur Durchführung des BImSchG (22. BImSchV) - Verordnung über Immissionswerte vom 26.10.1993, BGBl I S. 1819, g. am 27.05.1994, BGBl I S. 1095

³⁹ Richtlinie 96/62/EG des Rates v. 27.09.1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität, Amtsbl. der Europ. Gem. Nr. L 296/55

⁴⁰ Richtlinie 1999/30/EG des Rates v. 22.04.1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft, Amtsbl. d. europ. Gem. v. 29.06.1999, L 163/41

⁴¹ Richtlinie 2000/69/EG des Rates v. 16.11.2000 über Grenzwerte für Benzol und Kohlenmonoxid in der Luft, Amtsbl. d. europ. Gem. v. 13.12.2000, L 313/12; berichtigt ABl. Nr. L 111/31 vom 20.04.2001

Tabelle 6: Verkehrsbezogene Immissions- und Konzentrationswerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Komponente	Definition	22. BImSchV	23. BImSchV	Definition	1999/30/EG, 2000/69/EG und 2002/3/EG (#)
NO ₂	98 %-Wert	200	160	1h-MW bzw. 99,8 %-Wert	200 (≤ 18 Überschreitungen pro Jahr)
NO ₂				JMW	40
Blei	JMW	2	-	JMW	0,5
CO				8h-MW	10.000
Benzol	JMW	-	10	JMW	5
Ruß	JMW	-	8	JMW	-
Feinstaub PM ₁₀				24h MW bzw. 90,4 %-Wert	50 (≤ 35 Überschreitungen pro Jahr)
Ozon	1h MW	180*, 360 **	-	1h-MW	180*, 240** (#)

* Schwellenwert für die Information der Bevölkerung

** Warnwert zum Schutz vor Gesundheitsgefahren

3.2 Immissionssituation an Straßen

Die Immissionssituation in Innerortsbereichen und stark befahrenen Außerortsstraßen ist in erster Linie durch die Dichte und den Ablauf des Kfz-Verkehrs bestimmt. Ein Vergleich typischer Kfz-bedingter Immissionskonzentrationen mit Konzentrationsbereichen städtischer und allgemeiner Hintergrundbelastung findet sich in Tabelle 7.

Tabelle 7: Kfz-bedingte Immissionskonzentrationen und Grundbelastungswerte⁴²

Konzentrationen (mg/m^3)					
Schadstoffkomponente	Bezugswert	Stadtstraßen ¹⁾	Autobahnen ²⁾	städtische Grundbelastung ³⁾	bundesweite Grundbelastung ⁴⁾
Kohlenmonoxid	1/2 h-HW	10 - 15	3 - 6	5 - 10	≤ 1
	JMW	1-2	1	1	$< 0,5$
Stickstoffmonoxid	1/2 h-HW	0,7 - 1,2	0,5 - 1,0	0,4 - 0,7	$< 0,1$
	JMW	0,03 - 0,09	0,02 - 0,07	0,01 - 0,04	$\leq 0,01$
Stickstoffdioxid	1/2 h-HW	0,1 - 0,3	0,1 - 0,2	0,1 - 0,2	$< 0,1$
	JMW	0,03 - 0,07	0,03 - 0,06	0,03 - 0,06	$\leq 0,015$
Summe organ. Verbindungen (o.Methan)	1/2 h-HW	-0,5 - 1	0,5 - 1	0,5 - 1	$< 0,2$
	JMW	0,05 - 0,1	$< 0,1$	0,05 - 0,1	$< 0,05$
Blei	JMW	0,00002 - 0,00005	$< 0,0005$	$< 0,00002$	$< 0,00001$
Ruß	JMW	0,005 - 0,015	0,005 - 0,008	0,004 - 0,006	$\leq 0,002$
Benzol	JMW	0,003 - 0,01	0,003 - 0,006	0,002 - 0,004	$\leq 0,001$

Erläuterungen:

1/2 h-HW = höchster Halbstunden-Mittelwert

JMW = Jahresmittelwert

Durchschnittlicher täglicher Verkehr:

1) DTV: 15.000 - 30.000 Kfz/24h, 5 % Lkw-Anteil, vier Fahrstreifen, Immissionsort 1,5 m vom Straßenrand und 1,5 - 3 m hoch

2) DTV: 40.000 - 60.000 Kfz/24h, 15 % Lkw-Anteil, vier Fahrstreifen, Immissionsort 10 m vom Straßenrand und 1,5 m hoch

3) Großstadt im Ballungsgebiet

4) bei mittleren Durchmischungsverhältnissen

⁴² Quellen: Umweltbundesamt, Lufthygienische Jahresberichte und verkehrsbezogene Messungen des Bayer. Landesamtes für Umweltschutz

In den Hauptverkehrszeiten am Morgen und am Abend sind jeweils erhöhte Immissionskonzentrationen von Stickstoffmonoxid (NO), CO und CH zu erwarten. Da NO in der Atmosphäre schnell zu Stickstoffdioxid (NO₂) umgewandelt wird, erfolgt gleichzeitig oder etwas zeitvershoben auch ein Anstieg der Stickstoffdioxidkonzentration. Die Kfz-Abgasbestandteile CO, CH und NO_x sind Vorläuferkomponenten für **Photooxidantien**. Deshalb steigen bei schönem Wetter am späteren Vormittag auch die Immissionskonzentrationen der Photooxidantien, insbesondere des Ozons (O₃) an und nehmen im Laufe von mehreren Schönwettertagen immer mehr zu. Abb. 2 zeigt einen typischen Tagesverlauf der Komponenten CO, NO, NO₂ und O₃ an der Immissions-Messstation München-Lothstraße. In unmittelbarer Straßennähe und in Innerortsbereichen ist allerdings die Ozonkonzentration in der Regel niedriger als auf dem freien Land, da Ozon vor allem durch NO zunächst unter NO₂-Bildung abgebaut wird. NO₂ wird jedoch nachfolgend wieder unter Ozonbildung photolytisch zerlegt. Das folgende Gleichungssystem soll den Zusammenhang im photostationären Gleichgewicht darstellen:

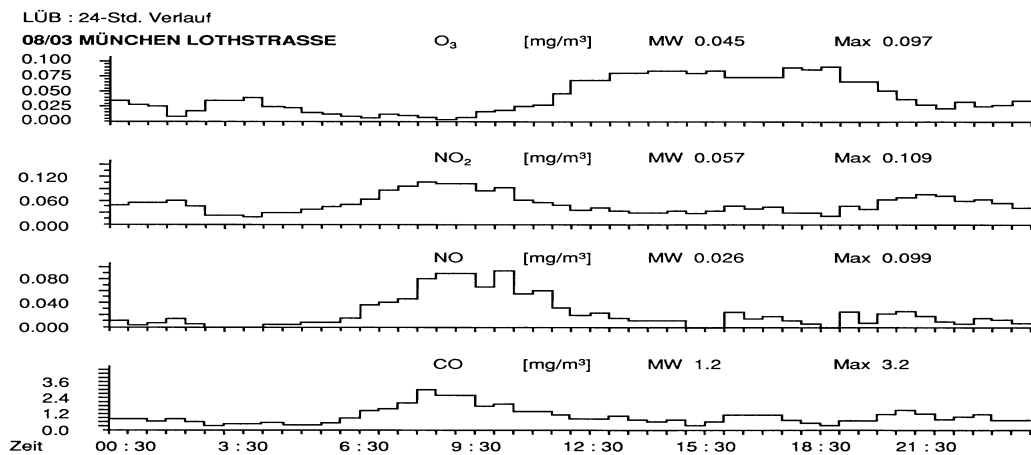
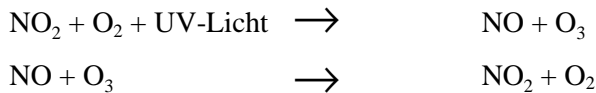


Abb. 2: Typischer sommerlicher Tagesverlauf der CO-, NO-, NO₂- und O₃-Immissionskonzentrationen an einer Großstadtstraße

Die Konzentrationen von Kfz-Abgasen nehmen im hindernisfreien, ebenen Gelände mit wachsender Entfernung zur Straße exponentiell ab. Mit zunehmender **Windgeschwindigkeit** werden die Schadstoffe besser verdünnt. In Abb. 3 sind abstandsabhängige Konzentrationsverläufe von CO an einer Autobahn bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten dargestellt.

Straßennahe Hindernisse, wie Bewuchs, Lärmschutzanlagen, Gebäuderiegel, bewirken im Allgemeinen durch Erhöhung der Turbulenz eine Verringerung der Immissionen. Abb. 4 zeigt die relative Abnahme von NO_x-Immissionen mit zunehmender Entfernung von einer Straße mit und ohne Lärmschutzwand (Höhe: 4 m)⁴³.

⁴³ Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen MLuS-92. geänderte Fassung 1996, Köln 1996

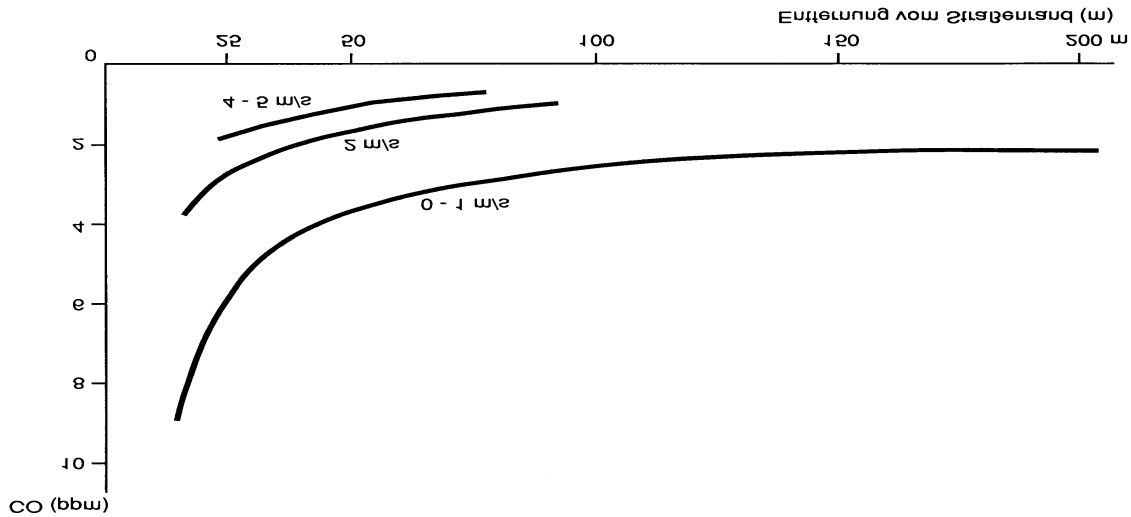


Abb. 3: CO-Immissionskonzentrationen an einer Autobahn bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten

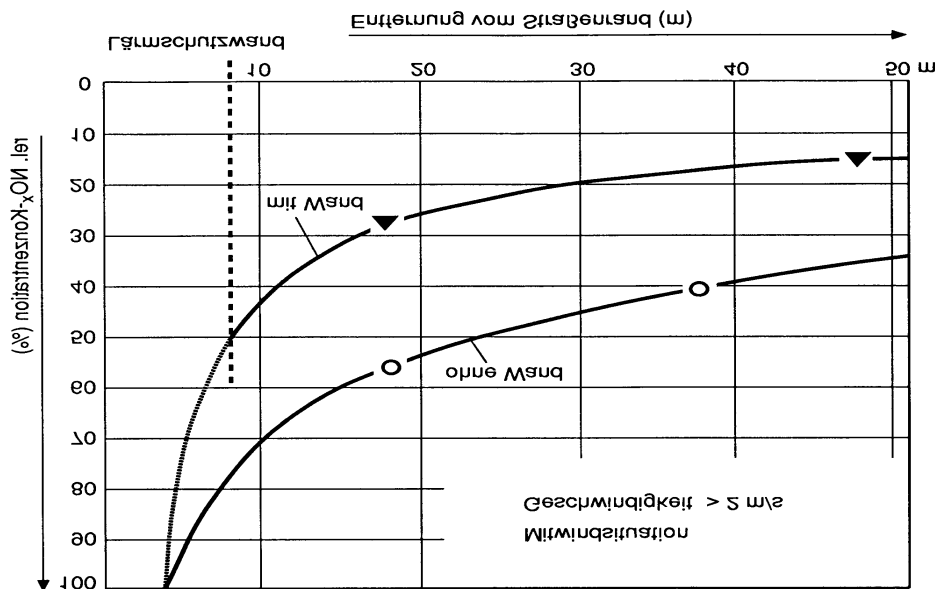


Abb. 4: Einfluss einer Lärmschutzwand (LSW) auf die NO_x -Immission

Quelle: Bundesanstalt für Straßenwesen

3.3 Einträge von straßenverkehrsbedingten Immissionen in Böden

Neben den Motoremissionen können von Kraftfahrzeugen über Undichtigkeiten von Motor und Getriebe **Ölrückstände** und durch Korrosion **Metallverbindungen** in die nähere Umgebung der Straße gelangen. Im Winter kann **Streusalz** staubförmig oder gelöst von der Straße aufgewirbelt und im Randbereich wieder niedergeschlagen werden. Eine Untersuchung des Verbandes der landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Darmstadt, an erdigem Material aus Straßenbanketten ergab u.a. folgende Ergebnisse:

Die Gehalte an **PCB** und **Mineralöl** lagen bei den untersuchten Proben im Bereich ubiquitärer Werte. Ein Einfluss des Verkehrs war nicht nachzuweisen. Hinsichtlich der Reste von **Auftausalzen** konnten bei der Untersuchung der Bankette bei allen Straßenarten leicht erhöhte Gehalte an Natrium ermittelt werden. Anreicherungen des leichter auswaschbaren Chlorids waren nur andeutungsweise in unmittelbarer Straßennähe festzustellen. Die ermittelten Werte lagen überall weit unter der Schädigungsschwelle.

Chlorid-Niederschlagsmessungen, die im Winterhalbjahr 1993/94 an einem bayerischen Autobahnabschnitt in einem Abstand zwischen 20 m und 100 m von der Fahrbahn durchgeführt worden sind, erbrachten Mittelwerte, die mit der Entfernung von 3,8 auf $2 \mu\text{g Cl/m}^2\text{d}$ abnahmen.

Im einem Gutachten der Staatlichen Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg über „Schadstoffbelastung von Böden durch Kraftfahrzeugverkehr“⁴⁴ wurden zur Schwermetallbelastung von Straßenrändern vor 1988 u.a. folgende Erkenntnisse gewonnen: Eindeutig erhöhte Gehalte an **Blei** und **Cadmium** in Böden und Aufwuchs haben nur die schmalen Streifen von 1 m Breite beiderseits aller untersuchten Straßentypen (Autobahnen, Bundesstraßen, Kreisstraßen). Am höchsten sind sie an Autobahnen, wo auch die Grenzwerte der Klärschlamm- (Böden) bzw. der Futtermittelverordnung (nur bei Blei) wiederholt überschritten werden. Weiter nach außen nimmt die Kontamination steil ab und ist bei Cadmium schon ab 4 bis 6 m, bei Blei im Mittel ab 20 bis 25 m Entfernung in den Böden nicht mehr unmittelbar mit dem Verkehr in Verbindung zu bringen. Im Aufwuchs lässt sich der Bleiausstoß neben Autobahnen noch bis 50 m, neben anderen Straßen noch bis etwa 10 m Abstand von der Straße nachweisen; Cadmium liegt schon ab 4-6 m im Normalbereich.

Eine weitere Untersuchung des Bayerischen Geologischen Landesamtes am Autobahnring A99 bei München von 1988 kommt zu ähnlichen Ergebnissen:

Eindeutige Anreicherungen der Elemente Blei, Cadmium, Zink und Kupfer waren im Oberboden in Abständen bis 10 m, teilweise nur bis 5 m von der Fahrbahn nachweisbar⁴⁵.

Diese Ergebnisse sind für Straßenneubauten bzw. Erweiterungen dahingehend zu relativieren, dass bleihaltiges Benzin derzeit nicht mehr im Handel ist, so dass auch die Blei-Emissionen und -Immissionen nur noch in geringem Umfang aus Reibbelägen zu erwarten sind.

Neuerdings stellt sich zunehmend die Frage nach den Wirkungen von katalysatorbedingten Austrägen von Edelmetallen wie Platin, Palladium und Rhodium im Einwirkungsbereich von Straßen. Mit Hilfe von Bioindikatoren und bei Bodenuntersuchungen wurden seit Einführung der Katalysatortechnik in Kfz zunehmende Anreicherungen dieser Komponenten festgestellt⁴⁶. Dabei scheint zumindest Platin über Oxidations- und Komplexbildungsprozesse im Boden mobilisierbar zu sein und von Pflanzen auch über die Wurzeln aufgenommen zu werden. Allerdings sind bei Kulturpflanzen nach bisherigen Untersuchungen die Aufnahmeleistungen sehr gering; zudem scheint die Anreicherung weniger in den generativen (Früchten) als in den vegetativen Pflanzenteilen zu erfolgen. Aus den bisher gemessenen Platinkonzentrationen in Kulturpflanzen lassen sich nach bisherigen Erkenntnissen noch keine Gesundheitsrisiken ableiten. Das sonst noch in der Katalysatortechnik verwendete Metall Palladium scheint eine höhere Bioverfügbarkeit aufzuweisen als Platin. Die zunehmende Substitution des Platins durch dieses Metall ist daher aus gesundheitlicher Sicht nicht ganz unbedenklich.

4. Wirkung kfz-spezifischer Immissionen auf den Menschen und Beurteilung⁴⁷

Kohlenmonoxid (CO) behindert den Sauerstofftransport des Blutes. Länger anhaltende Konzentrationen $> 50 \text{ mg/m}^3$ können bei empfindlichen Personen zu Herz-Kreislauf-Beschwerden, Kopfschmerzen und Übelkeit führen. Kurzfristig können Konzentrationen bis 200 mg/m^3 in Garagen und Straßentunnels auftreten. Dieser Wert ist derzeit für die Auslegung der Belüftung dieser Bauwerke maßgeblich. Im allgemeinen sind jedoch die mittleren CO-Konzentrationen auch an stark befahrenen Straßen in innerstädtischen Bereichen niedriger als 5 mg/m^3 . Für das Halbstundenmittel ist in der Richtlinie VDI 2310 „Maximale Immissionswerte“⁴⁸ eine Konzentration von 50 mg/m^3 , für das Jahresmittel 10 mg/m^3 angegeben. Dieser Wert darf auch nach der Richtlinie 2000/69/EG als höchster 8-Stunden-Mittelwert eines Tages zum Schutz der menschlichen Gesundheit nicht überschritten werden.

⁴⁴ Hoffmann G., Scholl W., Trenkle A., Staatliche landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg, Schadstoffbelastung von Böden durch Kraftfahrzeugverkehr. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1989

⁴⁵ Ruppert H., Jonek M., Anthropogene Schwermetallanreicherungen in bayerischen Böden vor dem Hintergrund der natürlichen Grundgehalte. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. Materialien Nr. 54, München 1988

⁴⁶ Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie und GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, "Edelmetall-Emissionen", Abschlusspräsentation Hannover, 17. und 18.10.1996, (Kurzfassungen der Vorträge) München 1997

⁴⁷ Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg), Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf die menschliche Gesundheit. Informationsschrift, Bonn 1987

⁴⁸ Verein Deutscher Ingenieure, Handbuch zur Reinhaltung der Luft Band 1, Richtlinie VDI 2310, Maximale Immissionskonzentrationen. Beuth Verlag Köln, Berlin, Sept. 1974

Für die Summe der gasförmigen organischen Verbindungen (CH) ist kein Immissionsgrenzwert festgelegt. Da es sich hierbei um ein Gemisch aus Komponenten mit unterschiedlichen Eigenschaften handelt, ist eine Beurteilung des Summenparameters hinsichtlich der Wirkungskriterien sehr schwierig. Maßgeblich für die Wirkung sind Geruchsträger (z.B. Aldehyde) und andere, z.T. krebserregende Stoffe oder Stoffe mit Verdacht auf krebserzeugendes Potential (z.B. Aldehyde, Benzol, PAK). Auch die photooxidantienfördernde Wirkung kfz-spezifischer Kohlenwasserstoffe (z.B. Olefine, aromatische Kohlenwasserstoffe) ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen. So kann der relative Beitrag der von Kfz emittierten Alkylbenzole zur Ozonbildung im Großstadtgas 80- bis 150-fach höher sein, als der von Methan, obwohl dieses in ca. 100-fach höherer Konzentration vorliegt.

Der CH-Inhaltsstoff **Benzol** kann beim Menschen Veränderungen des Blutbildes und Krebs hervorrufen. Im Sinne einer Risikobegrenzung wird vom Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) unter Berücksichtigung mehrerer kanzerogener Stoffe auf der Basis eines Gesamt-Erkrankungsrisikos für die Bevölkerung bei 70-jähriger Einwirkungszeit von 1:1000 ein Orientierungswert von $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und ein Zielwert (Gesamtrisiko 1:2500) von $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Jahresmittel vorgeschlagen⁴⁹. In der 23. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz ist als Konzentrationswert für die Prüfung von Verkehrsbeschränkungen ein Jahresmittel von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vorgegeben. Dieser Wert wird in hoch verkehrsbelasteten innerstädtischen Straßenschluchten zur Zeit noch gelegentlich überschritten. Allgemein besteht jedoch ein deutlicher Trend zu niedrigeren Immissionskonzentrationen. Die EU sieht in der 2. Tochterrichtlinie zur Luftqualitätsrichtlinie 96/62/EG⁵⁰ des Rates einen Immissionswert von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel ab 2010 vor. Die Hintergrundbelastung im ländlichen Bereich liegt bereits deutlich unter dem LAI-Zielwert.

Die **Aldehyde** stellen Reizstoffe für Nase und Augen dar. Die Leitkomponente **Formaldehyd** steht zudem im Verdacht, ein krebserzeugendes Potential zu besitzen. Zur Risikobegrenzung für eine Dauerbelastung in Innenräumen wurde vom Bundesgesundheitsamt eine Richtkonzentration von $0,12 \text{ mg}/\text{m}^3$ vorgeschlagen. Die Formaldehydkonzentration in innerstädtischer Luft beträgt im Jahresmittel etwa $0,005 - 0,01 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Von den **Stickstoffoxiden (NO_x)** ist **Stickstoffdioxid (NO₂)** unmittelbar von lufthygienischer Bedeutung, während **Stickstoffmonoxid (NO)** und andere Stickstoffoxide im Zusammenhang mit ihrer Funktion als Vorstufen für die Bildung von NO₂ und Ozon zu sehen sind. Aus Tierversuchen ergab sich bei relativ kurzfristigen Einwirkungen von NO₂ in Konzentrationen der Größenordnung von $0,4$ bis $0,6 \text{ mg}/\text{m}^3$ nicht nur eine allgemeine Reizung der Atemorgane, sondern auch eine erhöhte Anfälligkeit der Bronchien gegenüber infektiösen Erkrankungen⁵¹. In der Nähe stark befahrener Innenstadtstraßen können kurzzeitig Spitzenimmissionen auftreten, die in dieser Größenordnung liegen. Die als 98-Perzentile der Halbstundenwerte eines Jahres (d.h. nur 2 % der Messwerte liegen über diesem Wert) definierten Immissionsbelastungen liegen in Innenstädten meist bei 50-80 % des für die zulässige Belastung festgelegten Immissionswertes von $0,200 \text{ mg}/\text{m}^3$ der 22. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (22. BImSchV). Durch die Europäische Union ist in der Tochterrichtlinie 1999/30/EG zur Luftqualitätsrichtlinie 96/62/EG des Rates eine Verschärfung der Immissionswerte für Stickstoffoxide erfolgt: Zum Schutz der menschlichen Gesundheit soll ab dem Jahr 2010 ein 99,8 %-Wert von $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und ein Jahresmittelwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gelten. Zum Schutz ökologisch bedeutsamer Gebiete ist ein Jahresmittelwert von $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für Gesamtstickoxide (angegeben als NO₂) festgelegt.

Ein direkter Zusammenhang zwischen der Konzentration von NO₂ und der Ozonkonzentration ergibt sich nach den Ergebnissen flugzeuggetragener Messungen insbesondere bei Schönwettersituationen im Abwindbereich von Stickstoffoxidemittenten, z.B. Großstädten oder fossil befeuerten Kraftwerken.

Bei **Schwefeldioxid (SO₂)**, das aus den im Benzin und Dieselkraftstoff enthaltenen Schwefelverbindungen stammt, ist der vom Kfz-Verkehr herrührende Teilbetrag sehr gering im Vergleich zum Emissionsanteil aus den Quellengruppen Industrie, Gewerbe und Haushaltungen (Ges. Deutschland 1994: 51.000 t entspr. 1,7 % der gesamten anthropogenen Emissionen). Schwefeldioxid ist ein Reizgas, das bei Konzentrationen über $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ zu Atemwegsirritationen führen kann. Im allgemeinen liegen die deutschen Jahresdurchschnittskonzentrationen in innerstädtischen Bereichen zwischen $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in wenig industrialisierten Bereichen und unter $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Gegenden mit überwiegendem Einsatz von Braunkohle zu Heiz- und Energieerzeugung.

⁴⁹ Länderausschuss für Immissionsschutz, Beurteilungswerte für luftverunreinigende Immissionen. Bericht an die Umweltministerkonferenz, Stand 22.09.1994

⁵⁰ Richtlinie 2000/69/EG über Grenzwerte für Benzol und Kohlenmonoxid in der Luft vom 16.11.2000, ABl. Nr. L 313/12 vom 13.12.2000

⁵¹ Verein Deutscher Ingenieure, Handbuch zur Reinhaltung der Luft Band 1, Richtlinie VDI 2310 Bl. 12, Maximale Immissionskonzentrationen für Stickstoffdioxid. Beuth Verlag Köln, Berlin, Juni 1986

gewinnungszwecken. Zum Vergleich beträgt der als Tagesmittelwert definierte Immissionswert der Richtlinie 1999/30/EG zum Schutz der menschlichen Gesundheit $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und der Jahresmittelwert zum Schutz von Ökosystemen $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Verkehrsbedingter **Schwebstaub** enthält lufthygienisch relevante Stoffe, z.B. Rußpartikeln, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle. Eingeatmeter Staub, im wesentlichen Schwebstaub, enthält nicht-lungengängige Anteile (Grobstaub) und lungengängige Anteile (Feinstaub, PM_{10}). PM_{10} ist als Staub definiert, der einen Abscheider passiert, welcher Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von $10 \mu\text{m}$ zu 50 % abscheidet. Der aerodynamische Teilchendurchmesser der unmittelbar vom Motor emittierten Partikeln liegt allerdings unter $1 \mu\text{m}$. Diese Fraktion ist von unmittelbarer lufthygienischer Bedeutung, wobei der Grad der Ablagerung (Deposition) der eingeatmeten Partikeln in den Atemwegen vom aerodynamischen Partikeldurchmesser abhängt. Bei üblicher kombinierter Nasen- und Mundatmung passieren etwa 50 % aller $10\text{-}\mu\text{m}$ -Partikeln und noch etwa 30 % aller $15\text{-}\mu\text{m}$ -Partikeln den Rachen und dringen in die tieferen Atemwege ein. Partikeln $>7 \mu\text{m}$ erreichen selten die kleinen Bronchien. Partikeln von <1 bis $7 \mu\text{m}$ gelangen bis in die kleinen und kleinsten Bronchien und in die Lungenbläschen. Generell führt die Einwirkung von Schwebstaub zu einer Irritation der Bronchialschleimhaut. Chronische Staubbelastungen führen zu chronischer Bronchitis sowie zu Lungenfunktionsveränderungen. Der größere Teil der in den Atemwegen deponierten Staubpartikeln wird aus den Bronchien durch das Flimmerepithel in den Nasen-Rachen-Raum zurücktransportiert und von dort abgehustet oder verschluckt. Im Bereich der Lungenbläschen durchdringen lösliche Anteile der Partikel die Zellwandung der kleinen und kleinsten Bronchien und der Lungenbläschen und treten schließlich in das Blut über. Unlösliche Partikel, die in die Lungenbläschen gelangt sind, werden von Fresszellen (Makrophagen) eingeschlossen und auf dem Weg über Lymph- und Blutbahnen über die Ausscheidungsorgane Niere und Darm entsorgt. Epidemiologische Untersuchungen konnten einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Feinstaub-Immission und der Morbidität bzw. der Mortalität herstellen.

Zwischen Schwebstaub und anderen Luftschadstoffen müssen auch mögliche Kombinationswirkungen in Betracht gezogen werden. Eine wichtige Begleitsubstanz ist SO_2 . Die gesundheitlichen Auswirkungen von SO_2 und Schwebstaub sind wegen ihrer oft engen Korrelation besonders schwer zu trennen.

Blei (Pb) als Bestandteil des kfz-bedingten Schwebstaubs bewirkt eine Hemmung der Hämoglobinsynthese sowie Störungen des Zentralnervensystems bei Kindern und des peripheren Nervensystems bei Erwachsenen. Nach dem Inkrafttreten des Benzinbleigesetzes und durch die Einführung bleifreier Benzinsorten ist die atmosphärische Bleibelastung in Deutschland stark zurückgegangen. Typische Innenstadtbelastungen liegen derzeit bei $0,02\text{-}0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Der für das Pb-Jahresmittel festgelegte IW1 der TA Luft sowie der Immissionswert der 22. BImSchV betragen $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$; der von der WHO vorgeschlagene Leitwertbereich für die Atemluft im Jahresmittel liegt bei $0,5\text{-}1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Durch die Europäische Union ist in der Tochterrichtlinie 1999/30/EG zur Luftqualitätsrichtlinie 96/62/EG des Rates der Immissionswert für Blei neu festgelegt worden. Er beträgt ab 2005 im Jahresmittel $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Bei **Rußpartikeln** wurde im Tierversuch eine Lungentumor erzeugende Wirkung nachgewiesen, welche teilweise auf die angelagerten PAK, teilweise auf besondere Partikeleigenschaften zurückgeführt wird. Für Rußpartikel werden vom LAI unter Berücksichtigung mehrerer kanzerogener Stoffe Jahresmittelwerte von $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Orientierungswert (Gesamtrisiko 1:1000, und von $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Zielwert (Gesamtrisiko 1:2500) vorgeschlagen. In der 23. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz ist als Konzentrationswert für die Prüfung von Verkehrsbeschränkungen ein Jahresmittel von $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vorgegeben. Dieser Konzentrationsbereich wird in verkehrsbelasteten innerstädtischen Straßenschluchten und Kreuzungsbereichen zur Zeit nicht selten überschritten.

Die Substanzklasse der **polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK)** und der **nitrierten PAK (Nitro-PAK)** umfasst mehrere hundert Verbindungen, von denen einige krebserregend sind. Für **Benzo(a)pyren (BaP)**, das als Leitkomponente angesehen wird, sind vom LAI unter Berücksichtigung mehrerer kanzerogener Stoffe auf der Basis eines Gesamtrisikos von 1:1000 $3 \text{ ng}/\text{m}^3$ als Orientierungswert und $1,3 \text{ ng}/\text{m}^3$ als Zielwert (Gesamtrisiko 1:2500) für das Jahresmittel vorgeschlagen worden. 1999 lag das Benzo(a)pyren-Jahresmittel an verkehrsnahen Messstationen in Nordrhein-Westfalen unter $1 \text{ ng}/\text{m}^3$.

Ozon (O₃) ist zwar kein unmittelbar von Kraftfahrzeugen emittierter Schadstoff, entsteht jedoch aus verkehrsbürtigem NO_x und CH. Es schädigt auf Grund seiner oxidativen Wirkung die Bronchiolen und Alveolen der Lunge. Reversible Veränderungen der Lungenfunktion können bei erhöhter körperlicher Aktivität bereits bei Konzentrationen von 160 µg/m³ auftreten. Erkenntnisse aus Tierversuchen deuten darauf hin, dass eine Ozonexposition das Risiko einer Infektion durch Viren und Bakterien erhöht. Die Geruchsschwelle für Ozon liegt zwar mit 40-50 µg/m³ sehr niedrig; wegen einer extrem schnellen Adaption sind in der Außenluft vorkommende Ozonkonzentrationen aber nach kurzer Zeit nicht mehr wahrnehmbar. Die toxische Wirkung von Ozon auf Pflanzen beruht ebenfalls auf seinen oxidativen Eigenschaften, vor allem auf die Oberflächen der intrazellulären Hohlräume, wobei letztlich Störungen im Wasserhaushalt und Beeinträchtigungen der Photosyntheseleistung resultieren. Dabei spielen aber Meteorologie sowie Ernährungszustand und Alter der Pflanzen eine entscheidende Rolle. In der Richtlinie VDI 2310 Bl. 15⁵² ist für Ozon zum Schutz des Menschen ein Halbstunden-MIK-Wert von 120 µg/m³ festgelegt. Diese Richtlinie weist auch darauf hin, dass im Falle von Überschreitungen bis 400 µg/m³ für einen kurzfristigen Zeitraum (bis 0,5 h) nicht mit einem nennenswerten Risiko zu rechnen ist. In der Richtlinie VDI 2310 Bl. 6⁵³ sind für die einmalige Einwirkung auf mittelempfindliche Pflanzen ein Halbstunden-MIK-Wert von 480 µg/m³ und ein 8-Stunden-MIK-Wert von 180 µg/m³ angegeben. Die 22. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz definiert für die menschliche Gesundheit Schwellenwerte in Form eines 8-Stunden-Mittelwertes (110 µg/m³), eines 1-Stunden-Mittelwertes zur Information der Bevölkerung (180 µg/m³) und eines 1-h-Mittelwertes als Warnwert zum Gefahrenschutz (360 µg/m³). Für den Schutz der Vegetation sind dort 200 µg/m³ als 1-Stunden-Mittelwert und 65 µg/m³ als 24-Stunden-Mittelwert angegeben. Die EU sieht in der Tochtrichtlinie 2002/3/EG über den Ozongehalt der Luft⁵⁴ einen Immissionswert von stündlich 120 µg/m³ im gleitenden 8-Stundenmittel vor, der ab 2010 an maximal 25 Tagen/Jahr (gemittelt über 3 Jahre) überschritten werden darf. Der Schwellenwert für die Information beträgt 180 µg/m³, der Alarmwert 240 µg/m³. Bis zum 09.09.2003 müssen diese Werte in nationales Recht umgesetzt werden. Die Ozonkonzentrationen können in Deutschland zwischen weniger als 10 µg/m³ im Winter und maximal etwa 300 µg/m³ nach längeren Schönwetterperioden im Sommer liegen. Ein 8-Stundenmittelwert von 120 µg/m³ wurde im jährlichen Mittel (1999-2001) in Bayern an 38 Tagen an der Messstelle Eining (Donautal, ländlich), an 16 Tagen an der Messstelle München-Johanneskirchen (Stadttrand) und an 2 Tagen an der Messstelle München-Stachus (Stadtzentrum, verkehrsnah) überschritten. Das Ozon-Jahresmittel beträgt in besiedelten Regionen etwa 30 bis 60 µg/m³.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Ausarbeitung wurde die derzeitige Situation der Luftreinhaltung im Straßenverkehr mit technischen Fakten, gesetzlichen Grundlagen und Wirkungskriterien hinterlegt. Dabei ist im Abschnitt 2 vor allem auf den Stand der Abgasreinigungstechnik und auf realistische Möglichkeiten zur weiteren Emissionsminderung am Kraftfahrzeug eingegangen worden. Die Auswirkungen verkehrslenkender und planerischer Maßnahmen wurden nur kurz und summarisch gestreift, obwohl sich auch hier ein weites Feld von Möglichkeiten zur Luftreinhaltung auftut, das heute einer lebhaften politischen Diskussion ausgesetzt ist. In den Abschnitten 3 (Immissionen an Straßen) und 4 (Wirkungen) wurde die Ist-Situation der Immissionen an Straßen lufthygienischen Grenz- und Orientierungswerten gegenübergestellt, um ein Gespür für Probleme zu wecken, die heute vor allem durch den innerörtlichen Straßenverkehr entstehen.

Für den Inhalt:

Ref. 1/6 „Verkehr und Mobile Messungen“, Dr. Peter Rabl (RD)

Bayer. Landesamt für Umweltschutz, Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg,
Tel. 0921/9071-0, Internet: www.bayern.de/lfu

⁵² Verein Deutscher Ingenieure, Handbuch zur Reinhaltung der Luft Band 1, Richtlinie VDI 2310 Bl. 15, Maximale Immissionskonzentrationen für Ozon (und photochemische Oxidantien). Beuth Verlag Köln, Berlin, April 1987

⁵³ Verein Deutscher Ingenieure, Handbuch zur Reinhaltung der Luft Band 1, Richtlinie VDI 2310 Bl. 6, Maximale Immissionswerte zum Schutz der Vegetation, Maximale Immissionskonzentrationen für Ozon. Beuth Verlag Köln, Berlin, April 1989

⁵⁴ Richtlinie 2002/3/EG über den Ozongehalt der Luft vom 12.02.2002, ABl. L 67/14 v. 09.03.2002