

***Art und Menge von stofflichen  
Emissionen aus dem Verkehrsbereich***

**Literaturstudie**

Thomas Wiedmann, Jörg Kersten,  
Karlheinz Ballschmiter

**Nr. 146 / Mai 2000**

**Arbeitsbericht**

ISBN 3-932013-84-0

ISSN 0945-9553

***Akademie für Technikfolgenabschätzung  
in Baden-Württemberg***

Industriestr. 5, 70565 Stuttgart

Tel.: 0711 • 9063-0, Fax: 0711 • 9063-299

E-Mail: [info@ta-akademie.de](mailto:info@ta-akademie.de)

Internet: <http://www.ta-akademie.de>

Ansprechpartner:

Prof. K. Ballschmiter

E-Mail: [karlheinz.ballschmiter@ta-akademie.de](mailto:karlheinz.ballschmiter@ta-akademie.de)

Tel.: 0711-9063130

Die *Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg* gibt in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeitern sowie ausgewählte Zwischen- und Abschlussberichte von durchgeführten Forschungsprojekten als *Arbeitsberichte der TA-Akademie* heraus. Diese Reihe hat das Ziel, der jeweils interessierten Fachöffentlichkeit und dem breiten Publikum Gelegenheit zu kritischer Würdigung und Begleitung der Arbeit der Akademie zu geben. Anregungen und Kommentare zu den publizierten Arbeiten sind deshalb jederzeit willkommen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Verkehrsentwicklung: Kennzahlen für Baden-Württemberg, Deutschland und die EU.....	1
1.2 Verkehrsemissionen in Baden-Württemberg und Deutschland – Status Quo .....	5
1.2.1 Allgemeines.....	5
1.2.2 Kohlendioxid.....	9
1.2.3 Kohlenmonoxid.....	10
1.2.4 Stickstoffoxide .....	10
1.2.5 Schwefeldioxid.....	11
1.2.6 Staub .....	11
1.2.7 Flüchtige organische Verbindungen (VOC) .....	12
1.2.7.1 Stoffliche Differenzierung der VOC .....	14
1.3 Abgasgesetzgebung.....	19
1.4 Vorhersage der Verkehrsemissionen in Deutschland .....	22
1.5 Wirkungen von Verkehrsemissionen.....	26
1.5.1 Humantoxikologie .....	26
1.5.1.1 Akute Wirkungen .....	26
1.5.1.2 Chronische Wirkungen .....	26
1.5.2 Ökotoxikologie.....	27
1.5.3 Treibhauseffekt.....	27
1.5.4 Bildung bodennahen Ozons .....	28
1.5.5 Eutrophierung.....	30
1.5.6 Versauerung .....	30

1.5.7	Ozonabbau in der Stratosphäre .....	32
<b>2</b>	<b>Organische Emissionen des Straßenverkehrs – ein Überblick .....</b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>Emissionen von Einzelstoffen aus dem Straßenverkehr .....</b>	<b>39</b>
3.1	Hinweise zum Lesen der Tabellen in diesem Kapitel .....	39
3.2	Kohlenwasserstoffverbindungen .....	41
3.2.1	Azyklische, gesättigte Kohlenwasserstoffe .....	41
3.2.2	Azyklische, ungesättigte Kohlenwasserstoffe .....	51
3.2.3	Zyklische, gesättigte und ungesättigte Kohlenwasserstoffe .....	57
3.2.4	Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (BTX-Aromaten) ....	61
3.2.5	Biphenyl und alkylierte Biphenyle .....	67
3.2.6	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe .....	68
3.2.7	Alkylierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe.....	77
3.2.8	Sonstige aromatische Kohlenwasserstoffe .....	85
3.3	Sauerstoffhaltige Verbindungen.....	86
3.3.1	Alkohole, Phenole und Ether .....	86
3.3.2	Azyklische Aldehyde und Ketone.....	88
3.3.3	Aromatische Aldehyde .....	94
3.3.4	Aromatische Ketone .....	97
3.3.5	Carbonsäuren .....	102
3.3.6	Sauerstoffhaltige Heterozyklen.....	107
3.4	Aliphatische Stickstoffverbindungen .....	108
3.4.1	Amine .....	108
3.4.2	Stickstoffhaltige Heterozyklen .....	109
3.4.3	Sonstige stickstoffhaltige Verbindungen.....	110
3.5	Nitroverbindungen (Nitroarene).....	111
3.5.1	Aromatische Nitroverbindungen.....	113
3.5.2	Oxidierete aromatische Nitroverbindungen .....	119
3.5.3	Heteroaromatische Nitroverbindungen .....	121

3.6	Schwefelhaltige aromatische Verbindungen (PASK).....	122
3.6.1	Schwefelhaltige Heterozyklen (PASK) .....	123
3.6.2	Nitrierte PASK (Nitro-PASK) .....	125
3.7	Halogenhaltige Verbindungen.....	126
3.7.1	Halogenierte Kohlenwasserstoffe und halogenierte PAK .....	129
3.7.2	Halogenierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane .....	130
3.8	Anorganische Verbindungen.....	136
3.8.1	Gasförmige anorganische Verbindungen.....	136
3.8.2	Sonstige anorganische Verbindungen und Elemente .....	140
3.8.3	Metalle .....	142
<b>4</b>	<b>Neue Technologien zur Emissionsminderung.....</b>	<b>147</b>
4.1	Alternative Kraftstoffe .....	147
4.1.1	Veränderte Zusammensetzung herkömmlicher Kraftstoffe .....	148
4.1.2	Sauerstoffanreicherung von Benzin bzw. Dieselmotoren .....	148
4.1.3	Alkohole (Methanol, Ethanol).....	149
4.1.4	Flüssiggas (LPG) bzw. Erdgas (CNG/LNG) .....	150
4.1.5	Kraftstoffe aus regenerativen Energiequellen.....	151
4.1.6	Wasserstoff.....	152
4.2	Alternative Antriebs- und Motorenkonzepte .....	152
4.2.1	Verbesserte Motoren.....	152
4.2.2	Elektrofahrzeuge .....	154
4.2.3	Hybrid-Antrieb .....	154
4.2.4	Brennstoffzellenfahrzeuge .....	154
4.2.5	Das Hypercar <sup>TM</sup> .....	158
4.3	Verbesserte Abgasreinigungstechniken .....	160
4.3.1	SCR-Katalysatoren für Lkw.....	161
4.3.2	Oxidationskatalysator und Partikelfilter für Dieselfahrzeuge.....	162
<b>5</b>	<b>Schlussbetrachtung.....</b>	<b>163</b>

<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>168</b>
<b>7</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>187</b>
	7.1 Begriffsdefinitionen.....	187
	7.2 Verwendete Abkürzungen .....	188
	7.3 Tabellenverzeichnis .....	190
	7.4 Abbildungsverzeichnis .....	193

## Vorwort

Immer mehr Menschen überwinden in immer mehr Fahr- und Flugzeugen immer weitere Entfernungen. Immer mehr Güter werden in größeren Lastkraftwagen über weitere Strecken transportiert. Gleichzeitig fühlen sich mehr Menschen durch Lärm und Abgase belästigt. Die Akzeptanz für die negativen Auswirkungen des Verkehrs sinkt.

Das Phänomen Verkehr ist vielschichtig. Es ist nicht nur ein physikalisch-chemisches, sondern auch ein ökonomisches, soziologisches und psychologisches Phänomen. Es gibt gute Ideen und Konzepte, wie der Verkehr dauerhaft umweltgerecht oder sogar dem Leitbild der Nachhaltigkeit entsprechend gestaltet werden könnte<sup>1</sup>. Aber es ändert sich wenig. Weder Politiker noch Verwaltungen noch Verkehrswissenschaftler werden dem Problem im Grundsatz Herr. Einseitige Präferenzen bestimmen zudem oft die Marschrichtung der Politik<sup>2</sup>.

In diesem Arbeitsbericht, der das Ergebnis des Projektes "Art und Menge von stofflichen Emissionen aus dem Verkehrsbereich" der TA-Akademie ist, betrachten wir den Verkehr unter „ökologischen“, genauer gesagt unter stofflichen, unter umweltchemischen Gesichtspunkten. Der Verkehr hat sich in den vergangenen Jahrzehnten zu einem der wichtigen Bereiche in Umweltfragen (neue Straßen, Lärmemissionen, Abgasemissionen) entwickelt. Bedingt durch die niedrige Höhe in der die Abgase freigesetzt werden, treten die stofflichen Emissionen direkt in den unmittelbaren Atemraum des Menschen ein. Benzol und Rußpartikel in der Innenstadtluft sind verantwortlich für Krebserkrankungen. In Deutschland sterben pro Jahr gleich viele Menschen an Lungenkrebs durch verkehrsbedingte Luftschadstoffe wie durch Straßenverkehrsunfälle [Teufel et al. 1998]. Für den Sommersmog, d.h. die hohen Ozon-Konzentrationswerte bei starker Sonneneinstrahlung, ist der Straßenverkehr die Hauptursache. Weitere wesentliche, durch den Straßenverkehr verursachte Umweltbelastungen sind:

- Schwermetalle (die Bleibelastungen in den Waldböden Baden-Württembergs stammen zum ganz überwiegenden Teil aus dem Straßenver-

---

<sup>1</sup> z. B. Vester 1992, OECD 1996, UBA 1997b, Basler & Partner 1998.

<sup>2</sup> Am 23. Juni 1999 beschließt das Bundeskabinett unter Leitung von Kanzler Gerhard Schröder, einem Entwurf der geplanten EU-Altautoverordnung nicht zuzustimmen, der die kostenlose Rücknahme von Altautos durch die Autoindustrie vorsieht.

kehr; die Einträge von Edelmetallen aus den Katalysatoren in die Umwelt werden zunehmend kritisch beurteilt).

- Reifenabrieb (ca. 10.000t pro Jahr in Baden-Württemberg; enthält gesundheitsgefährdende Stoffe)
- Auftausalze (mehrere 10.000t pro Jahr)
- Abfallprobleme (die Produktion eines einzelnen Autos belastet die Umwelt mit etwa 25 Tonnen Abfällen; beim Verschrotten eines Autos - in Baden-Württemberg etwa 500.000 pro Jahr - entstehen u.a. etwa 100 kg Kunststoffabfälle pro Auto; 6 Mio. Altreifen pro Jahr fallen in Baden-Württemberg allein durch Pkw an).

Wo möglich, haben wir quantitative Angaben über die Menge der emittierten Stoffe gemacht (sog. Emissionsfaktoren in g/km bzw. mg/km). Jedoch schwanken die Emissionsfaktoren sehr stark, je nach Fahrsituation (Rollenprüfstand, Verkehr inner- und außerorts, Autobahn, etc.) und nach Fahrzeugtyp (Alter des Fahrzeugs, Hubraum, etc.). Eine Unsicherheit von mehreren Größenordnungen ist möglich, weshalb wir nur Mittelwerte aus möglichst vielen Messungen angeben. Die Fahrzeugtypen werden nur grob in Benzin-Pkw mit und ohne Katalysator und Diesel-Pkw sowie Lkw eingeteilt. Uns geht es hauptsächlich um die stoffliche Differenzierung der Emissionen aus dem Straßenverkehr.

- Wie sieht das chemische Gemisch, das den Auspuff verlässt, eigentlich aus?
- Welche Stoffe hat man bisher zu wenig beachtet?
- Hat der Katalysator die "Lage im Griff"?

Nach einer allgemeinen Einführung zur Situation in Baden-Württemberg und Deutschland und einer Auflistung der wichtigen bekannten Umwelt- und Gesundheitsprobleme (Kapitel 1) betrachten wir die Emissionen organischer Stoffe aus Automobilabgasen. Mehr als 800 einzelne Verbindungen enthält die Liste in Kapitel 3. Viele der in Tabellenform zusammengestellten Ergebnisse in diesem Arbeitsbericht gehen weit über bisherige Zusammenstellungen über Verkehrsemissionen hinaus. Zum Vergleich: lediglich vier Stoffe bzw. Stoffgruppen der in Kapitel 3 aufgeführten rund 800 Verbindungen sind in der Abgasgesetzgebung geregelt.

Schließlich geben wir in Kapitel 4 einen Ausblick auf neue technische Möglichkeiten zur Emissionsreduktion im Verkehr. Es könnte so einfach sein, sollte man meinen: ein Auto, das kurzfristig nicht fährt, z. B. an der Ampel oder im Stau, braucht keine Bewegungsenergie, muss also keinen Kraftstoff verbrauchen. Eine Motorabschaltung könnte die Emissionen in dieser Phase deutlich verringern.



Dieser Arbeitsbericht erlaubt eine differenzierte Beurteilung der aktuellen stofflichen Emissionen aus dem Verkehr. Nur das Wissen um diese stoffliche Komplexität erlaubt eine sachgerechte Bündelung in Bewertungsfragen. Ignoranz ist in jeder Hinsicht in diesem Problemkreis, wie auch ganz allgemein, ein schlechter Ratgeber. Wir hoffen, dass wir Anstöße für (zumindest technische) Innovationen liefern können, die zu weiteren Reduktionen der Verkehrsemissionen führen.

Stuttgart, Frühjahr 2000

Thomas Wiedmann

Jörg Kersten

Karlheinz Ballschmiter



# 1 Einleitung

Motorisierter Verkehr ist bis heute unweigerlich mit der Freisetzung von (Schad-) Stoffen verbunden. Egal ob beim öffentlichen oder individuellen Verkehr, auf der Straße, der Schiene, dem Wasser oder in der Luft: bei allen heute verwendeten Verkehrssystemen wird die in Kraftstoffen gespeicherte chemische Energie direkt (im Verbrennungsmotor) oder indirekt (über Strom) in Bewegungsenergie umgewandelt. Die dabei entstehenden Umwandlungsprodukte, allen voran das Kohlendioxid, werden in die Atmosphäre abgegeben. Fahrzeuge, die z. B. Sonnenenergie direkt in Bewegungsenergie umsetzen, sind nur in verschwindend kleinen Marktnischen vertreten. Sie sind im Betrieb emissionsfrei; bei der Herstellung des Fahrzeugs und der Solarzellen werden allerdings ebenfalls Stoffe freigesetzt, die in eine Gesamtbetrachtung der Effizienz solcher Fahrzeuge unter Umweltgesichtspunkten eingehen müssen.

Wie die nachfolgenden Kapitel zeigen, ist es in den letzten Jahren zum Teil gelungen, das Verkehrsaufkommen und die Entwicklung der Emissionen zu entkoppeln. Es besteht jedoch weiterhin in vielen Fällen Handlungsbedarf.

## 1.1 Verkehrsentwicklung: Kennzahlen für Baden-Württemberg, Deutschland und die EU

Der Straßenverkehr verzeichnete in der Vergangenheit ein beispielloses Wachstum<sup>1</sup>. Von 1960 bis 1996 hat sich der Pkw-Bestand in Deutschland um 862 Prozent erhöht. 1996 wurden 41 Mio. Fahrzeuge im Bundesgebiet gezählt. Bis zum Jahr 2005 wird sich der Bestand auf 46,5 Mio. erhöhen. Die jährlichen Gesamtfahrleistungen haben sich von 1960 bis 1996 um 606 Prozent gesteigert. Eine entsprechende Entwicklung im Straßenverkehr (und im Luftverkehr) ist auch in Baden-Württemberg zu beobachten (s. Abbildung 1-1 und Tabelle 1-1). Der Eisenbahn- und Schiffsverkehr hat sich dagegen in den letzten Jahren nicht erhöht.

---

<sup>1</sup> [Quelle: Umweltbundesamt, <http://www.umweltbundesamt.de>]

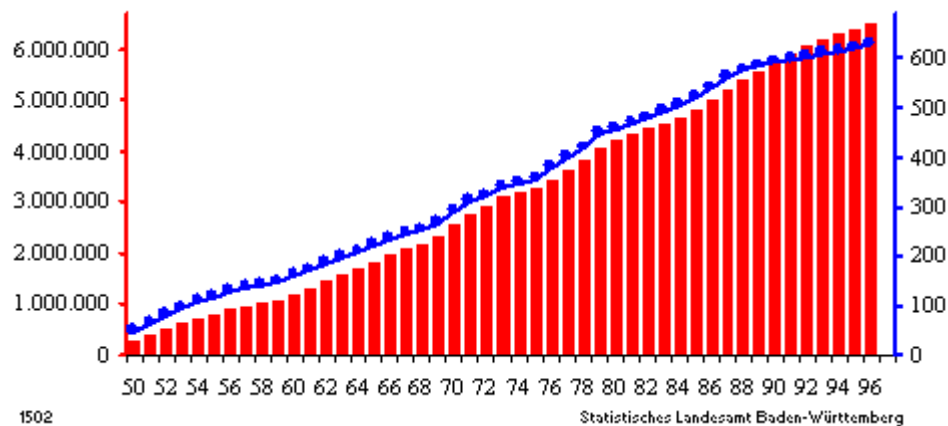


Abbildung 1-1: Anzahl der zugelassenen Kraftfahrzeuge (Säulen) und Kraftfahrzeuge je 1000 Einwohner (Punkte) in Baden-Württemberg seit 1950  
[Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg,  
<http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/langreih/kap15/f15.htm>]

<b>Straßenverkehr</b>	<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>1996</b>	<b>Einheit</b>
Bundesautobahnen	914	978	1 020	km
Bundesstraßen	4 775	5 006	4 994	km
Landesstraßen	12 694	10 118	9 992	km
Kreisstraßen	9 238	11 877	12 075	km
Kraftfahrzeugbestand (jeweils 1.7.)	4 222	5 765	6 505	1 000
Darunter				
Personenkraftwagen	3 603	4 919	5 467	1 000
Krafträder	104	234	363	1 000
Personenkraftwagen auf 1000 Erwachsene (Personen über 18 Jahre)	519	632	662	Anzahl
<b>Luftverkehr (Flughafen Stuttgart)</b>	<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>1995</b>	<b>Einheit</b>
Fluggäste (Ankunft und Abgang)	2 620	4 285	5 041	1 000
Frachtaufkommen	20	18	14	1 000 t
<b>Eisenbahnverkehr</b>	<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>1995</b>	<b>Einheit</b>
Güter-Versand	15 348	16 643	13 733	1 000 t
Güter-Empfang	23 235	21 396	17 331	1 000 t
<b>Binnenschifffahrt</b>	<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>1996</b>	<b>Einheit</b>
Versand	17 927	21 716	18 167	1 000 t
Empfang	23 795	22 723	22 249	1 000 t

Tabelle 1-1: Kennzahlen für den Verkehr in Baden-Württemberg  
[Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg,  
<http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/kennzbw/kennzbw.htm>]

Das Statistische Landesamt Baden-Württemberg veröffentlichte im März 1997 eine Studie, die eine Zunahme der Jahresfahrleistung bei Pkw bis zum Jahr 2010 in Baden-Württemberg um weitere 13% auf 79 Mrd. Kilometer prognostiziert. Noch stärker, nämlich um 27%, würden nach diesen Berechnungen die Lkw-Fahrleistungen ansteigen.

Weltweit hat Deutschland die meisten zugelassenen Kraftfahrzeuge pro Straßenkilometer (s. a. Tabelle 1-2).

	USA	Deutschland	Japan
Pro Tausend Einwohner gibt es ... Pkw	565	463	282
Auf einen Straßenkilometer entfallen ... Kfz	30	63	52
Durchschnittlich gefahrene Kfz-Kilometer pro Einwohner und Jahr	14.100	6.600	5.100

Tabelle 1-2: Verkehrskennzahlen im internationalen Vergleich  
 [Quelle: Umweltbundesamt, <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/kraftfahrzeuge-fahrleistung.htm>]

Desweiteren hält der Trend zu Fahrzeugen an, die immer größer, schwerer und leistungsstärker sind. Zwar prognostiziert das Umweltbundesamt von 1990 bis zum Jahr 2005 eine Absenkung des durchschnittlichen Pkw-Energieverbrauchs um 15 bis 20 Prozent. Doch diese Reduktion wird durch eine Zunahme der gefahrenen Kilometer (Fahrleistung) um 25 Prozent - bedingt vor allem durch einen weiteren Anstieg des Freizeitverkehrs - wieder mehr als wettgemacht. Der Trend zu kraftstoffintensiven Jeeps und Geländewagen macht sich nicht in der Pkw-Statistik bemerkbar, diese werden nämlich nicht in die Pkw-Kategorie eingeordnet. Nicht weniger problematisch ist der kaum wahrnehmbar steigende Flächenverbrauch für neue Straßen. Die hohe Zahl von Unfalltoten - immerhin sind in der Nachkriegszeit in Deutschland mehr als eine halbe Million Menschen im Straßenverkehr tödlich verunglückt - ist eine sozial akzeptierbarer Preis für die Eigengestaltung der Mobilität. 1996 kamen 8.755 Menschen ums Leben. Im Jahre 1999 waren es 7.749 Tote bei 521.000 Verletzten und insgesamt 2.4 Mio Verkehrsunfällen.

In den vergangenen Jahren stiegen auch die externen Kosten des Straßenverkehrs an: Schätzungen, wie hoch die Kosten für Verkehrsunfälle, Lärm, die Behandlung von Atemwegserkrankungen und andere Folgen des Straßenverkehrs sind, werden kontrovers diskutiert und schwanken zwischen 70 und mehr als 250 Milliarden Mark pro Jahr. In diesen Zahlen sind - aufgrund der Schwierigkeit einer Quantifizierung - langfristige Schäden in der Umwelt, z.B. des Klimawandels, nicht oder nur teilweise

enthalten [Krebs 1998]. Aus der Tatsache, dass solche Auswirkungen des Verkehrs nicht einfach quantifizierbar sind, folgt jedoch dann, dass sie nicht existieren. Hier ist noch ein offenes Feld für eine Technikfolgenabschätzung.

## 1.2 Verkehrsemissionen in Baden-Württemberg und Deutschland – Status Quo

### 1.2.1 Allgemeines

Die gesamten mit der **Nutzung** von Straßenkraftfahrzeugen verbundenen Emissionen setzen sich zusammen aus:

- den Abgasemissionen am Fahrzeug  
(direkte oder fahrzeugspezifische Emissionen)
- der Verdampfung von Kraftstoff  
(Verluste beim Tanken, Tankatmung, Leckagen)
- den Emissionen durch den Betrieb zusätzlicher Aggregate  
(Heizung, Klimaanlage, Licht)
- den Emissionen durch die Bereitstellung des Kraftstoffes  
(Exploration, Gewinnung, Transport, Raffination, Verteilung; auch Unfälle, Leckagen, Verdunstung, etc.)
- den Emissionen im Zusammenhang mit dem Reifenabrieb

Darin nicht berücksichtigt sind die Emissionen bei der **Produktion** und der **Entsorgung** von Fahrzeugen. Die im folgenden besprochenen stofflichen Emissionen sind stets die mit der Nutzung verbundenen, in den meisten Fällen sogar die direkten Abgasemissionen.

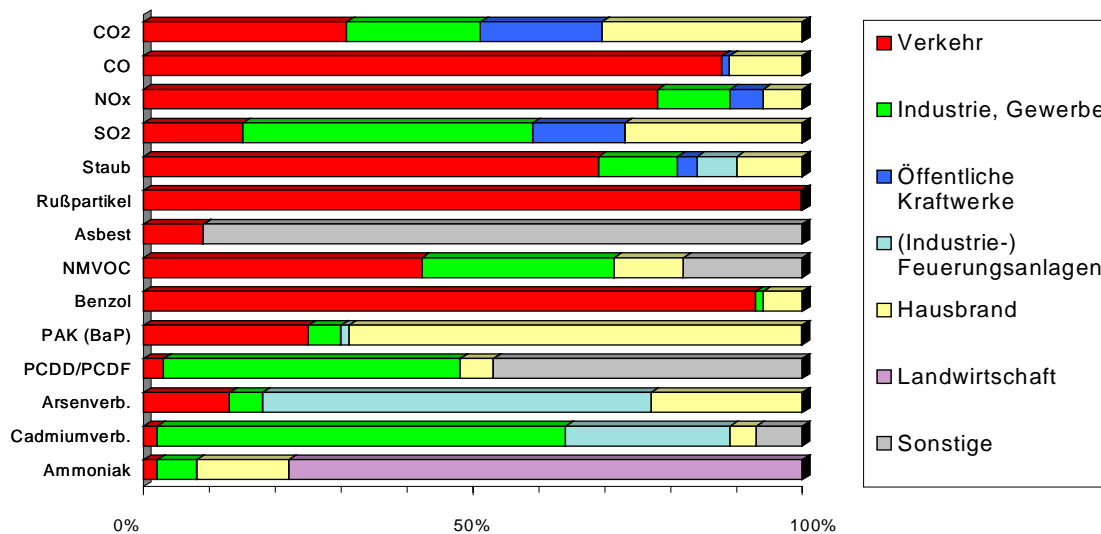


Abbildung 1-2: Verursacher von Luftschadstoffemissionen in Baden-Württemberg 1994 [LfU 1996]

**Hausbrand:** bei Ammoniak: Mensch/Haushalte, bei NMVOG: incl. Konsumgüter  
**Industrie, Gewerbe:** bei NMVOG: gewerbliche Lösemittelanwendung, bei Ammoniak: auch Kraftwerke, bei CO: auch Heizwerke  
**Sonstige Sektoren:** Öffentliche Kraftwerke, Industrie, Haushalte und Kleinverbraucher

Der Verkehr ist der Hauptverursacher für die Emissionen an Staub, Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC und NMVOG). Lediglich bei Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) spielt der Verkehr mit einem Anteil von 14 % (1993) eine untergeordnete Rolle (s. Abbildung 1-2 und Abbildung 1-3, die die Aussage in einer anderen Form darstellt). Der Anteil des Verkehrs an den Emissionen und damit auch dessen Bedeutung als Hauptemittent stieg beständig. Bei den VOC-Emissionen deutet sich eine geringfügige Abnahme des Verkehrsanteils an [LfU 1996].

Auch bei den krebserregenden Emissionen Benzol und Rußpartikel ist der Straßenverkehr der Hauptverursacher; bei letzteren praktisch der einzige (Abbildung 1-2).



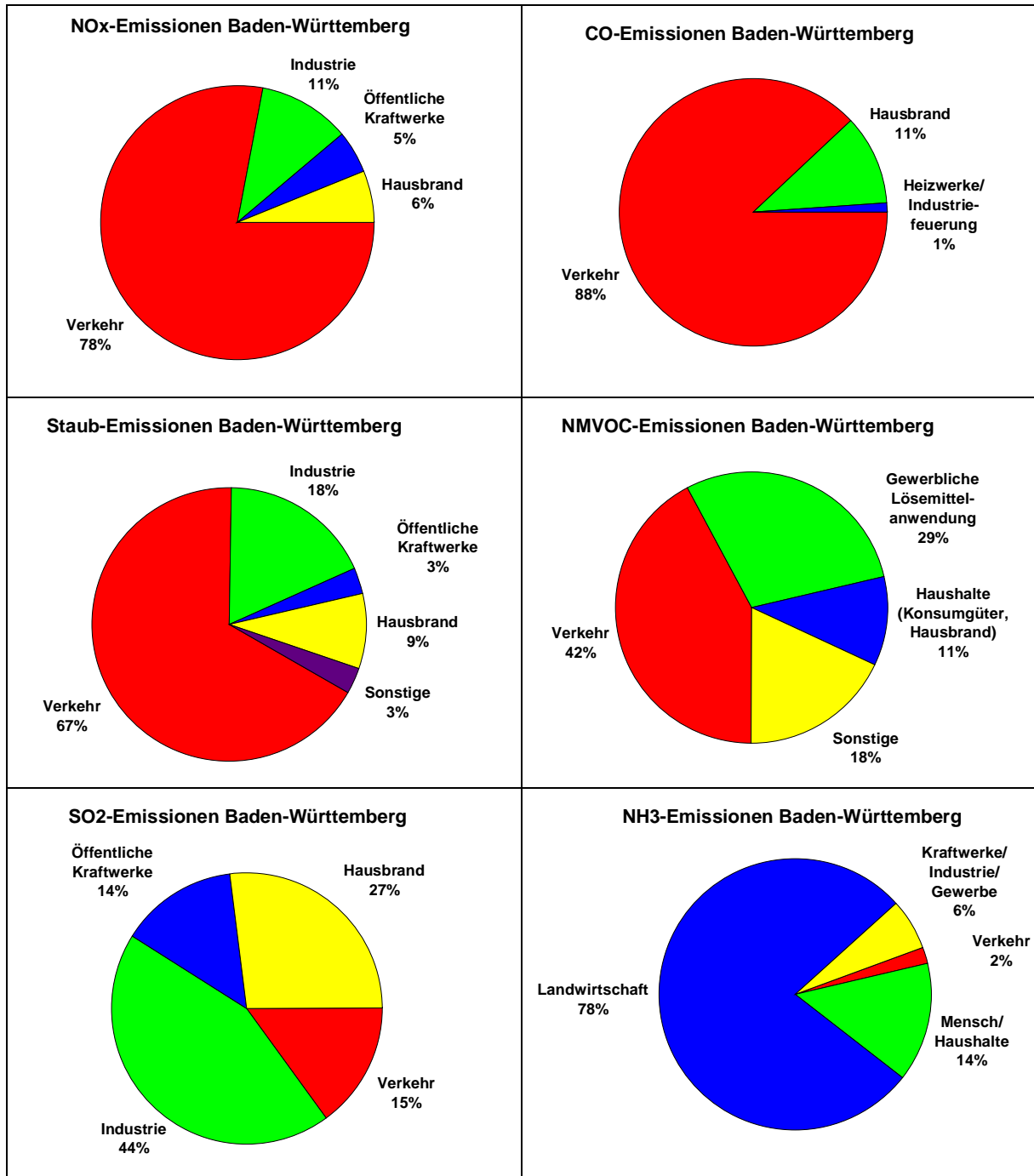


Abbildung 1-3: Anteile der Verursacher an den Gesamtemissionen wichtiger Luftschadstoffe in Baden-Württemberg für das Jahr 1994 (Ammoniak 1991) [LfU 1996]

Betrachtet man nur die verbrennungsbedingten Emissionen, so ergibt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 1-4). Der Straßenverkehr ist außer bei Kohlendioxid und Schwefeldioxid der Hauptverursacher. Bahn-, Schiffs- und Flugverkehr spielen (in bezug auf den Flugverkehr: noch) eine untergeordnete Rolle. Die Emissionen dieser drei Verkehrsarten betragen zusammen maximal 3 % an den Gesamtemissionen (Tabelle 1-3).

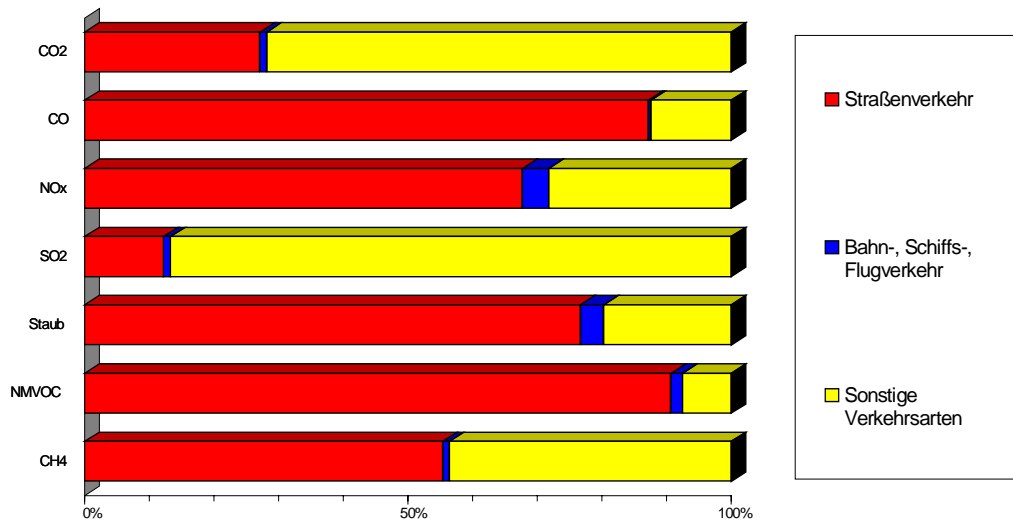


Abbildung 1-4: Anteile des Verkehrs an verbrennungsbedingten Gesamtemissionen in Baden-Württemberg 1994 [Krüger et al. 1998]

	Straßenverkehr [1000 t]	Bahn-, Schiffs-, Flugverkehr [1000 t]
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	19.639	763
Kohlenmonoxid (CO)	561	2,9
Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> )	141	8,6
Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	8,5	0,8
Staub (PM10)	18,4	0,9
Methan (CH <sub>4</sub> )	5,6	0,12
Flüchtige organische Verbindungen, ohne Methan (NMVOC)	126	1,94

Tabelle 1-3: Verkehrsbedingte Emissionen in Baden-Württemberg im Jahr 1994 [LfU 1996]

Seit 1984 werden in Deutschland zur Abgasreinigung bei Pkw Edelmetallkatalysatoren eingesetzt. In Baden-Württemberg waren 1996 80% aller Pkw schadstoffreduziert. Obwohl durch die Einführung des Katalysators pro Fahrzeug die Emissionen an Stickstoffoxiden, Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid um bis zu 90% verringert werden können (das klimawirksame Kohlendioxid ist chemisches Endprodukt von Verbrennung und Katalyse und wird unvermindert ausgestoßen), sieht die Bilanz der gesamten Fahrzeugflotte nüchterner aus: die Reduktionen wurden teilweise durch die starke Zunahme der Fahrzeuge und der Fahrleistungen kompensiert, sodass je nach Schadstoff und Fahrzeugtyp die Emissionen nur zwischen 15 und 50% reduziert werden konnten.

Es folgt ein Überblick über die Hauptemissionen des Straßenverkehrs in Baden-Württemberg und Deutschland [Daten überwiegend aus UBA 1996, UBA 1997 und LfU 1996].

## 1.2.2 Kohlendioxid

Das Umweltbundesamt schätzte 1997 den Anstieg der durch den Verkehr in Deutschland verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 auf knapp 25 Prozent. Andere Prognosen liegen nur wenige Prozentpunkte darunter oder darüber. Auch für Baden-Württemberg ergibt sich für den Zeitraum 1973 bis 1994 eine ausgeprägte Zunahme der verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Anders als bei den limitierten Abgasemissionen zeigt die Entwicklung der Kohlendioxidemissionen keine ausreichende Entkoppelung von den Fahrleistungen. Allein in den Jahren 1990 bis 1995 stiegen die Fahrleistungen und die Kohlendioxidemissionen gleichermaßen um 9%. Zwischen 1997 und 2010 erwartet das Umweltbundesamt eine Zunahme der Fahrleistungen im Straßenverkehr um 23% bei einer etwas niedrigeren Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen um weitere 15%.

Verbrauchsbegrenzende Maßnahmen an Fahrzeugen kommen nur schleppend voran, ebensowenig hat bisher eine Verhaltensänderung im Hinblick auf die Nutzung des Kraftfahrzeugs stattgefunden.

### Probleme

- Beitrag zum globalen Treibhauseffekt
- speziell beim Verkehr stetige Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen, dadurch
- teilweise Kompensation von Emissionsminderungserfolgen in anderen Teilbereichen

### 1.2.3 Kohlenmonoxid

Dominiert werden die Kohlenmonoxidemissionen durch den Verkehr, weil der spezifische Ausstoß von Kohlenmonoxid in den Kraftfahrzeugmotoren um ein Vielfaches höher ist als bei anderen Verbrennungsvorgängen. Obwohl der Verkehr nur mit knapp 30% am Verbrauch fossiler Energieträger beteiligt ist, erzeugt er in Baden-Württemberg 88% aller Kohlenmonoxidemissionen (s. Abbildung 1-3). Beim Verkehr blieben diese bis Ende der 80er Jahre auf gleichem Niveau. Infolge der Abgasregelung und der Verbesserung der Verbrennungsvorgänge in den Motoren sind sie trotz weiteren Anwachsens der Verkehrsleistung und damit des Kraftstoffverbrauchs seither rückläufig und werden auch in Zukunft weiter abnehmen.

Mit den sinkenden Kohlenmonoxid-Emissionen des Verkehrs seit Ende der 80er Jahre nahmen auch die Gesamtemissionen ab. Der Anteil des Verkehrs an den CO-Emissionen nahm nur geringfügig zu und betrug 88% im Jahr 1993.

### 1.2.4 Stickstoffoxide

Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ) entstehen fast ausschließlich bei Verbrennungsvorgängen in Anlagen und Motoren durch teilweise Oxidation des im Brennstoff und der Verbrennungsluft enthaltenen Stickstoffs. Sie werden überwiegend als Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ) emittiert, das anschließend in der Atmosphäre zu Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) oxidiert. Verbrennungsmotoren verursachen z. B. beträchtlich höhere energiezusammenfassende Emissionen als stationäre Feuerungsanlagen.

Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Verkehrs erreichten erst Ende der 80er Jahre ihr Maximum und zeigen seit 1989 eine kontinuierliche Abnahme. Der Einsatz des Katalysators führt trotz weiterhin steigender Fahrleistungen im Kraftfahrzeugverkehr zu einer Verminderung der verkehrsbedingten Stickstoffdioxid-Emissionen. Jedoch war die Abnahme der  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Verkehrs geringer als diejenige der übrigen Emittentengruppen. So stieg der Anteil des Verkehrs beständig an und lag 1994 in Baden-Württemberg bei 78% (Abbildung 1-3).

#### Probleme

- vereinzelte Überschreitungen von Luftqualitätsstandards für  $\text{NO}_2$
- Gefahr von Atemwegserkrankungen durch  $\text{NO}_2$ -Spitzenbelastungen
- Stickstoffoxide spielen eine wichtige Rolle bei der Bildung und dem Abbau des bodennahen Ozons

- Beitrag zu Versauerung von Niederschlägen
- Beitrag zur Überdüngung von Böden
- Beteiligung an chemischen Prozessen in der Atmosphäre; dabei u. a. Bildung von nitrierten Verbindungen und Organonitrat.

### 1.2.5 Schwefeldioxid

Auch der Verkehr trägt durch die Verwendung schwefelhaltiger Kraftstoffe (u.a. Diesel) zu den Schwefeldioxidemissionen bei. Bei der Verarbeitung von Erdöl entsteht Schwefeldioxid auch durch die Produktionsprozesse selbst. Der Anteil des Verkehrs an den SO<sub>2</sub>-Emissionen betrug 1994 15% (Abbildung 1-3).

Trotz der Reduzierung des Schwefelgehaltes im Dieselkraftstoff gehen die Emissionen des Verkehrssektors wegen der Zunahme der Verkehrsleistung nur sehr langsam zurück. Nur eine weitere Absenkung des Schwefelgehalts kann zu einer weiteren Reduktion der verkehrsbedingten SO<sub>2</sub>-Emissionen führen.

#### Probleme

- vereinzelte Überschreitung von Luftqualitätsstandards
- Beitrag zur Versauerung von Niederschlägen

### 1.2.6 Staub

Die Staub-Emissionen des Verkehrs stiegen in Baden-Württemberg seit Mitte der 80er Jahre stetig an, während die Summe der Staub-Emissionen aller Emittentengruppen Anfang der 90er Jahre deutlich abnahm. Dies führte zu einem stark gewachsenen Anteil des Verkehrs von 67% im Jahr 1994 an den gesamten Staubemissionen (Abbildung 1-3). Die Hälfte des vom Straßenverkehr erzeugten Staubes stammt von schweren Nutzfahrzeugen, also Lkw und Bussen. Etwa 40% sind den Pkw zuzuordnen und ca. 10% der Staubemissionen gehen auf das Konto von leichten Nutzfahrzeugen. Ruß- und Staubimmissionsmessungen<sup>1</sup> der Jahre 1995 bis 1998 in Baden-Württemberg ergaben keine signifikante Änderung der

---

<sup>1</sup> Als Meßgröße zur Bestimmung der **Ruß**konzentration wird der Anteil des elementaren Kohlenstoffs im abgeschiedenen **Schweb**staub (PM10) herangezogen.

Konzentrationen; ein Trend in eine bestimmte Richtung ist nicht zu erkennen [UMEG 1998].

Neben der emittierten Gesamtstaubmenge und der damit verbundenen Lungengängigkeit sind für die lufthygienische Situation solche Staubanteile von besonderer Bedeutung, die aufgrund ihres Durchmessers und der damit verbundenen Lungengängigkeit und/oder wegen kanzerogener Inhaltsstoffe ein besonderes Wirkungspotential besitzen. Neueste Entwicklung an Verbrennungsmotoren führen zur Verschiebung der Partikelemissionen hin zu feineren Partikeln.

Feinstaub-Messungen in Birmingham (UK) zeigten, dass in den Wintermonaten der Anteil der feinsten Partikel PM<sub>2,5</sub> an der PM<sub>10</sub>-Fraktion rund 80% ausmacht und gut mit den NO<sub>x</sub>-Immissionen korreliert, wodurch der Straßenverkehr als Hauptquelle von PM<sub>2,5</sub> bestätigt wird<sup>1</sup>. In den Sommermonaten machen dort die Feinstaubpartikel rund die Hälfte aller Partikel (PM<sub>10</sub>) aus; der Verkehr ist im Sommer eine von 3 Hauptquellen [Harrison et al. 1997]. Ein wesentlicher Anteil der Rußpartikelemissionen des Kraftfahrzeugverkehrs ist auf Reifenabrieb zurückzuführen [Israel et al. 1994].

### **Probleme**

- feine Partikel (weniger als 10 µm Korndurchmesser) nähern sich in ihrem Verhalten den Gasen und sind deshalb lungengängig. Sie können Atemwegserkrankungen auslösen und haben möglicherweise kanzerogenes Potential
- die Immissionen überschreiten teilweise Luftqualitätsstandards.

## **1.2.7 Flüchtige organische Verbindungen (VOC)**

Der Begriff "flüchtige organische Verbindungen" wird in der Literatur vielfach mit "VOC" abgekürzt. Diese Abkürzung entstammt dem englischen Begriff "Volatile Organic Compounds". In deutschsprachigen Arbeiten ist teilweise auch der Ausdruck "organische Gase und Dämpfe" mit der Abkürzung "OGD" zu finden.

Der Sammelbegriff VOC umfasst eine große Zahl an einzelnen Verbindungen. Eine allgemein anerkannte Abgrenzung bzw. Definition, welche Stoffe explizit als VOC einzuordnen sind, gibt es bislang nicht. Seitens verschiedener Institutionen liegen jedoch entsprechende Empfehlungen und Richtlinien vor. In der Mehrzahl werden

---

<sup>1</sup> Als PM<sub>10</sub> wird derjenige Schwebstaubanteil bezeichnet, der Partikel mit einem Durchmesser von 10 Mikrometern oder weniger enthält.

dabei diejenigen organischen Stoffe den VOC zugeordnet, die bei einer Temperatur von 20°C und einem Luftdruck von 1013 hPa einen Dampfdruck von mehr als 1,3 hPa aufweisen.

Neben den genannten Begriffen finden sich in der Literatur noch weitere Bezeichnungen und Abkürzungen, die zum einen der Beschreibung bestimmter Teilmengen der VOC dienen, zum anderen aber auch (unzutreffenderweise) stellvertretend für den Begriff VOC verwendet werden.

Methan wird vielfach aus den Betrachtungen ausgeklammert. Dies wird durch die Abkürzung "NMVOC" (Non-Methane Volatile Organic Compounds) zum Ausdruck gebracht.

Missverständlich kann die Verwendung der Ausdrücke "HC" oder " $C_mH_n$ " sein. Im streng chemischen Sinn sind darunter reine Kohlenwasserstoffe zu verstehen, d. h. Verbindungen, die ausschließlich Kohlenstoff und Wasserstoff enthalten, jedoch keine Heteroatome, wie z. B. Sauerstoff, Chlor oder Fluor. In der Literatur wird der Begriff unzutreffenderweise auch als Synonym für alle flüchtigen organischen Verbindungen benutzt.

Bei den flüchtigen organischen Verbindungen außer Methan (NMVOC) nahmen von 1988 bis 1994 die Emissionen des Verkehrs etwas stärker ab als die Gesamtemissionen, so dass sich eine leichte Abnahme des Verkehrsanteils ergab, der 1994 bei 42% lag (Abbildung 1-3). Der Verkehr bleibt aber nach wie vor Hauptverursacher von NMVOC-Emissionen in Baden-Württemberg. Tabelle 1-4 zeigt die absoluten Zahlen. Auch in anderen europäischen Ländern tragen die Emissionen von Kraftfahrzeugen deutlich zu den NMVOC-Emissionen bei [Derwent 2000].

Jahr	Straßenverkehr	Bahn-, Schiffs-, Flugverkehr	Literatur
1988	160,4	1,87	Statistische Berichte 1997a
1990	151,7	2,15	Statistische Berichte 1997a
1992	135,4	1,70	Statistische Berichte 1997a
1994	125,6	1,94	Statistische Berichte 1997a
1994	95,0		Krüger et al. 1998

Tabelle 1-4: NMVOC-Emissionen des Verkehrs in Baden-Württemberg (Einheit: 1000 t)

## Probleme

- Beitrag zur Bildung von bodennahem Ozon
- spezifische Wirkungen einzelner Stoffe (z. B. krebserzeugende Wirkung von Benzol; wahrscheinliche krebserzeugende Wirkung von Formaldehyd, Acetaldehyd, 1,3-Butadien; phytotoxische Wirkung von Ethen)
- Benzol: dritthöchstes Krebsrisikopotential bei Anwendung der LAI-Studie auf Baden-Württemberg (der LAI-Beurteilungswert bei einem Gesamtkrebsrisiko von 1 : 2.500 in Höhe von  $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  Benzol wird in Ballungsgebieten regelmäßig überschritten: Bereich der Immissionsmesswerte in Baden-Württemberg:  $2,3 - 4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- erhöhte Konzentrationen von Benzol in "Straßenschluchten" und in "Kindernasenhöhe"
- z. T. photochemische Umwandlung in Stoffe mit anderen Eigenschaften (z. B. Stoffe mit längerer Lebensdauer oder Versauerungspotential)
- z. T. Überschreitung von Luftreinhalte-Leitwerten bei BTX-Aromaten (Benzol, Toluol, Xylol).

### 1.2.7.1 Stoffliche Differenzierung der VOC

Die flüchtigen organischen Verbindungen lassen sich in Unterklassen einteilen. Im folgenden wird die stoffliche VOC-Zusammensetzung, wie sie in verschiedenen Literaturstellen beschrieben ist, in tabellarischer und graphischer Form wiedergegeben. Dabei wird zwischen den VOC-Emissionen der gesamten Fahrzeugflotte (Abbildung 1-5) und denen einzelner Fahrzeuge (Tabelle 1-5, Abbildung 1-6, Abbildung 1-7) unterschieden.

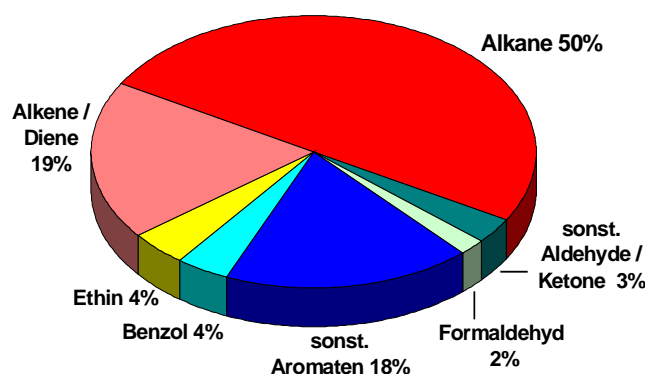


Abbildung 1-5: Anteile einzelner VOC-Substanzen oder Substanzgruppen an den VOC-Emissionen des Straßenverkehrs [LfU 1996]



Die gesamten VOC-Emissionen des Straßenverkehrs werden in Baden-Württemberg von den Alkanen (50%), den Alkenen / Dienen (19%) und den sonstigen Aromaten (18%) dominiert (Abbildung 1-5). Die Alkane stammen zu 56% aus dem Verkehr. Alkene/Diene kommen überwiegend aus biogenen Prozessen (62%) und dem Verkehr (27%). Bei den Aromaten liegt der Verkehr mit 54% vor den nicht energiebedingten Quellen mit 42%.

In Tabelle 1-1 sind typische VOC-Emissionsprofile eines Ottomotors und der niederländischen Kfz-Flotte aufgeführt. Die Profile ähneln sich stark, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die VOC-Zusammensetzung durch Benzin-Pkw dominiert wird.

VOC-Komponenten	VOC-Profil Benzin-betriebener Automotor mit Katalysator [Pierson 1994]	VOC-Profil niederländische Kfz-Flotte [Guicherit 1997]
Alkane (ohne Methan)	31%	43%
Methan	13%	3%
Alkene	9% (ohne Ethen)	15%
Ethen (Ethylen)	5%	ca.4% [Kuprian & Schaub 1998]
Ethin (Acetylen)	4%	4,8%
Aromaten	32% (ohne Benzol)	30%
Benzol	4%	3,3%
Toluol		8%
Aldehyde		4,8%
Formaldehyd	0,8%	
Sauerstoffhaltige Verbindungen	0,8% (ohne Formaldehyd)	

Tabelle 1-5: Typische VOC-Emissionsprofile eines Motors und einer Kfz-Flotte

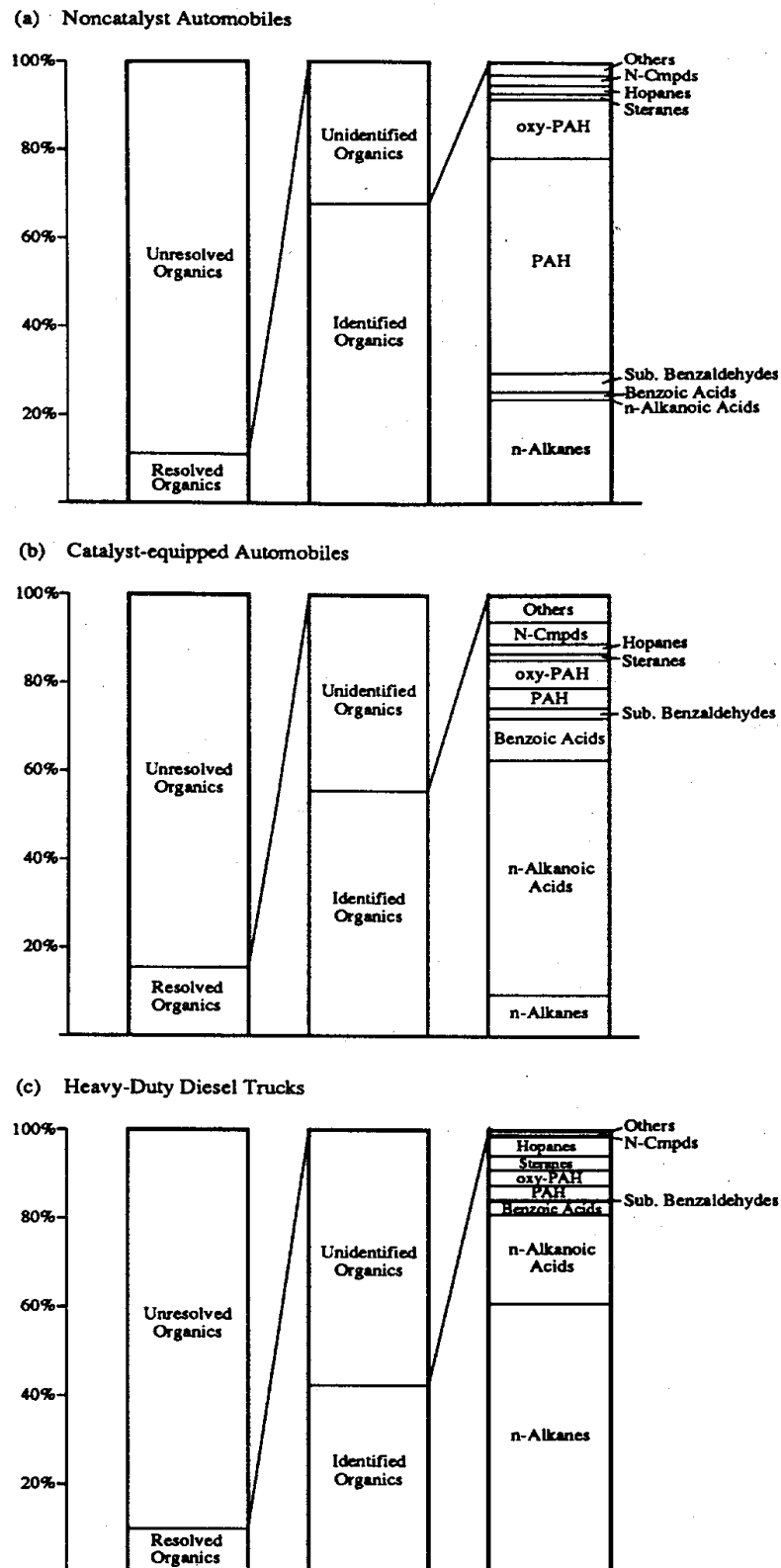


Abbildung 1-6: Massenbilanzierung der extrahierbaren organischen Verbindungen in Feinpartikelemissionen von a) Automobilen ohne Abgaskatalysator, b) Katalysatorautos und c) Lastkraftwagen [Rogge et al. 1993]

Rogge et al. (1993) extrahierten die von verschiedenen Fahrzeugklassen emittierten Feinpartikel mit organischen Lösungsmitteln und schlüsselten die darin gelösten organischen Verbindungen weiter auf. Die Massenbilanzierung ist in Abbildung 1-6 dargestellt. Die Hauptmenge der Verbindungen, die sog. "Unresolved Organics" (85 – 90%), kann aus analytisch-technischen Gründen nicht weiter differenziert werden. Es ist bekannt, dass sie hauptsächlich aus verzweigten und zyklischen Kohlenwasserstoffen besteht. Von derjenigen Massenfraktion, die in der Gaschromatographie in diskrete, einzelne Signale aufgeschlüsselt werden kann ("Resolved Organics"), wurden 42 – 68% als spezifische organische Verbindungen identifiziert ("Identified Organics"). Diese Zahlen verdeutlichen, trotz der stofflichen Breite der in diesem Arbeitsbericht vorgestellten Verbindungen, wie **wenig** von den emittierten Stoffen tatsächlich **bekannt** ist!

Die identifizierten Hauptkomponenten gehören bei Pkw ohne Katalysator zu der Gruppe der PAK (Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe) ("PAH"), bei Katalysatorfahrzeugen zu den organischen Säuren ("n-Alkanoic Acids") und bei den Diesel-Lkw zur Gruppe der Alkane ("n-Alkanes").

Eine ähnliche Massenbilanzierung wurde von Schauer et al. (1999) durchgeführt. Hier wurde die Gas-, die mittelflüchtige und die Partikelphase der Emissionen von Diesel-Lkw untersucht. Die in

Abbildung 1-7 gezeigten Ausschnitte machen deutlich, dass auch hier nur ein sehr kleiner Teil der im Abgas enthaltenen Verbindungen stofflich identifiziert werden kann. Einen erheblichen Anteil bilden auch hier die analytisch nicht aufgelösten Verbindungen ("UCM" = "unresolved complex matter", überwiegend aliphatische, verzweigte und zyklische Kohlenwasserstoffe). Bei den identifizierten Verbindungen dominieren in der Gasphase Carbonylverbindungen, in der mittelflüchtigen Phase die Alkane und auf den emittierten Partikeln sind hauptsächlich PAK adsorbiert.

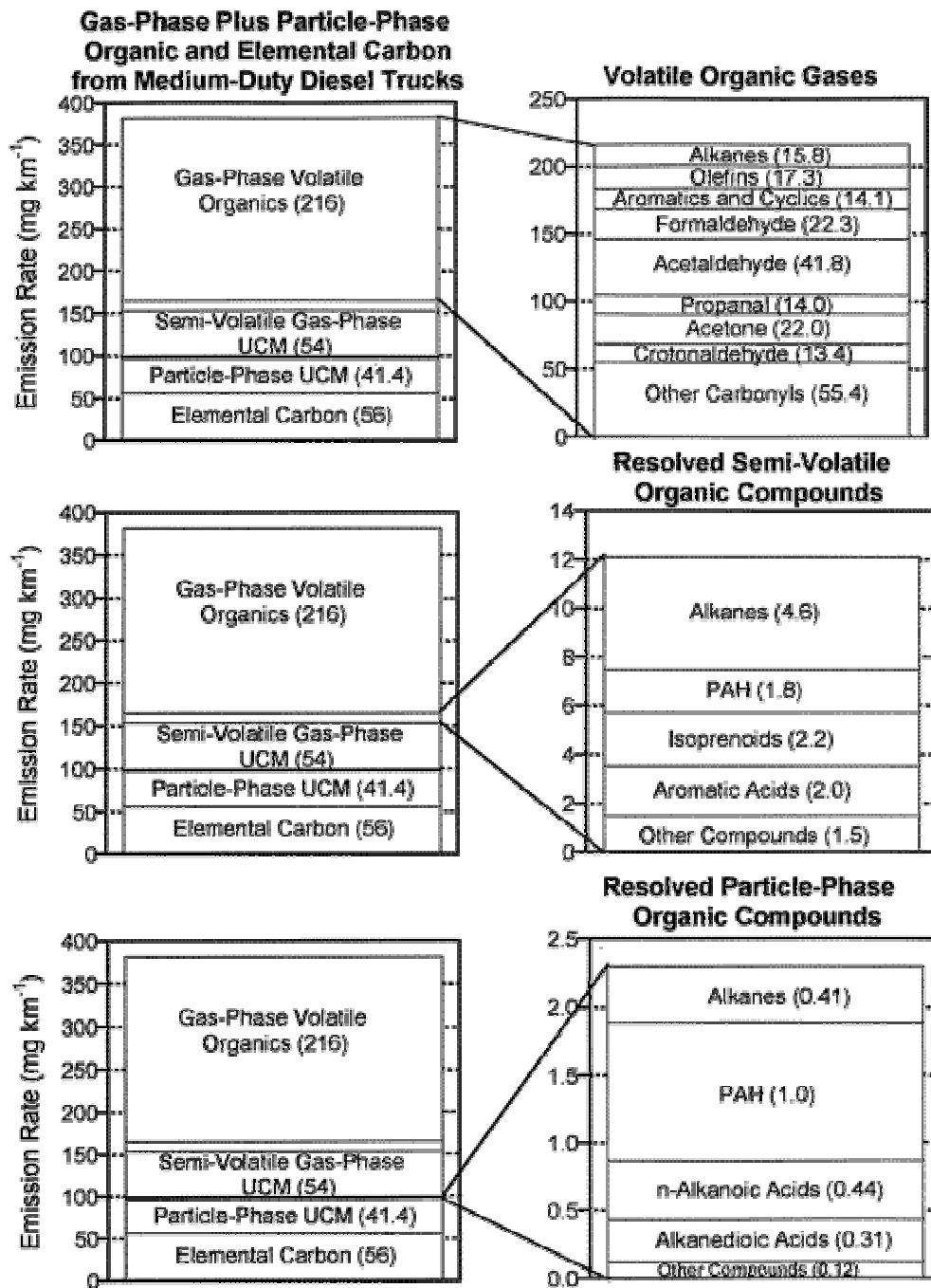


Abbildung 1-7: Massenbilanzierung der gasförmigen, mittelflüchtigen und partikelgebundenen organischen Verbindungen in Diesel-Lkw-Abgasen [Schauer et al. 1999].

### 1.3 Abgasgesetzgebung

Die Einführung einer europäischen Abgasgesetzgebung für CO-, HC-, NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen für Pkw im Jahr 1992 (EU-Abgasvorschrift 91/441/EWG, "Euro 1") machte insbesondere bei Pkw mit Ottomotor den Einsatz von geregelten Katalysatoren notwendig. Mit der Einführung der Stufe 2 (EU-Abgasvorschrift 94/12/EG, "Euro 2"), die für neue Pkw-Typen seit dem 1.1.1996 gültig ist und ab dem 1.1.1997 für alle neu zugelassenen Fahrzeuge Anwendung findet, musste das Abgasverhalten der Fahrzeuge weiter verbessert werden. Vorschläge für eine weitere Verschärfung der Abgasnorm ("Euro 3" und "Euro 4") wurden von der Europäischen Kommission vorgelegt. Die folgenden Abbildungen geben die Grenzwerte für die verschiedenen Schadstoffe für Personenkraftwagen graphisch wieder.

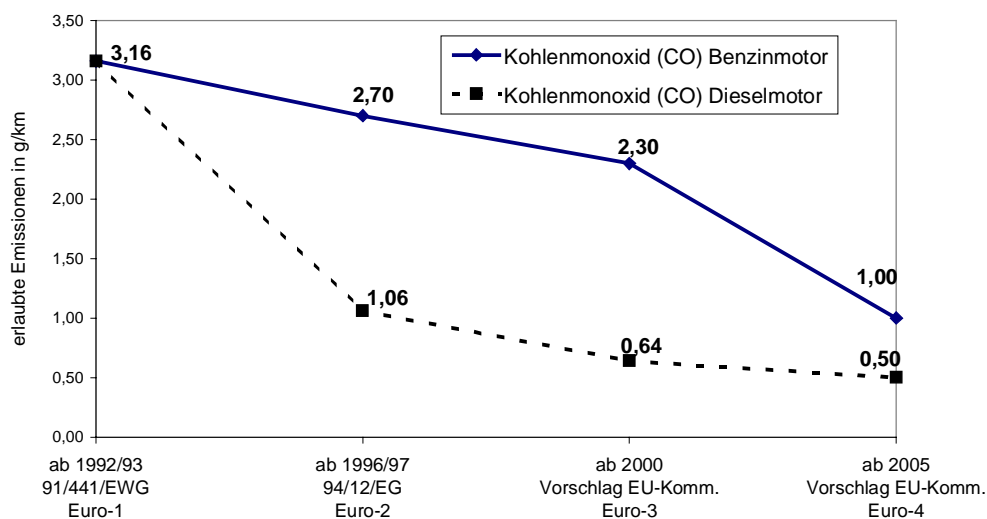


Abbildung 1-8: Abgasgrenzwerte für die Serienproduktion von Pkw: Kohlenmonoxid (g/km)  
 [Quelle: Umweltbundesamt Jahresbericht 1996]  
 (korrigierte Werte entspr. dem Wegfall der 40 s Leerlauf zu Beginn des Zyklus)

Eine weitere Maßnahme, mit deren Hilfe die Emissionen des Verkehrs zumindest zurückgedrängt werden sollen, ist eine neue Richtlinie zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG, mit der die Emissionsgrenzwerte bei neuen Kraftfahrzeugen und leichten Nutzfahrzeugen in der EU bis zum Jahr 2000 strenger gefasst werden. Für Autos bis zu 3,5 t werden die Obergrenzen für Kohlendioxid (um 40%), Kohlenwasserstoffe (40%), Stickstoffdioxid (20%) und Partikel (50%) abgesenkt. Eine nochmalige Verschärfung dieser Bestimmungen ist für 2005 geplant. Auch bei den Konzentratio-

nen von Schwefel, Benzol und aromatischen Kohlenwasserstoffen in Benzin- und Dieselmotoren wird es deutliche Reduzierungen geben.

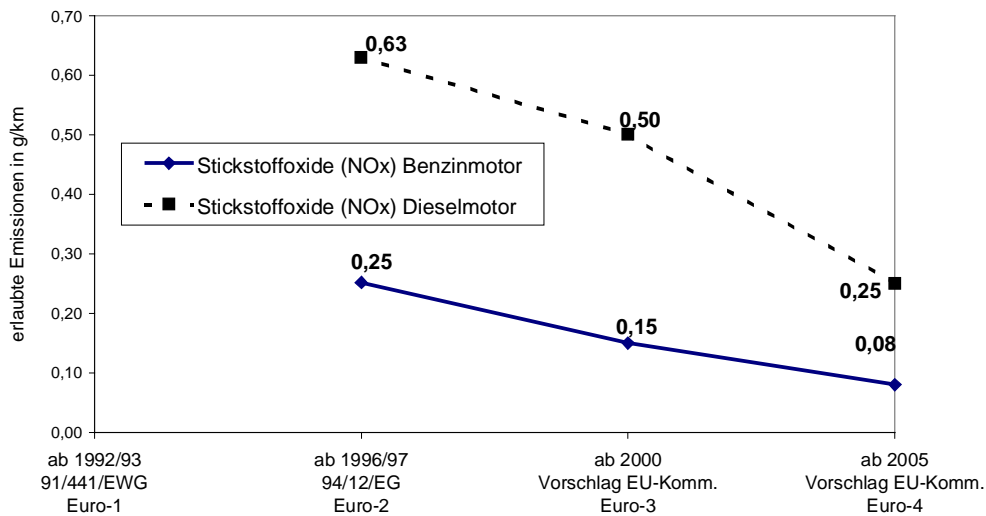


Abbildung 1-9: Abgasgrenzwerte für die Serienproduktion von Pkw: Kohlenwasserstoffe und Partikel (g/km) [Quelle: Umweltbundesamt Jahresbericht 1996] (korrigierte Werte entspr. dem Wegfall der 40 s Leerlauf zu Beginn des Zyklus)

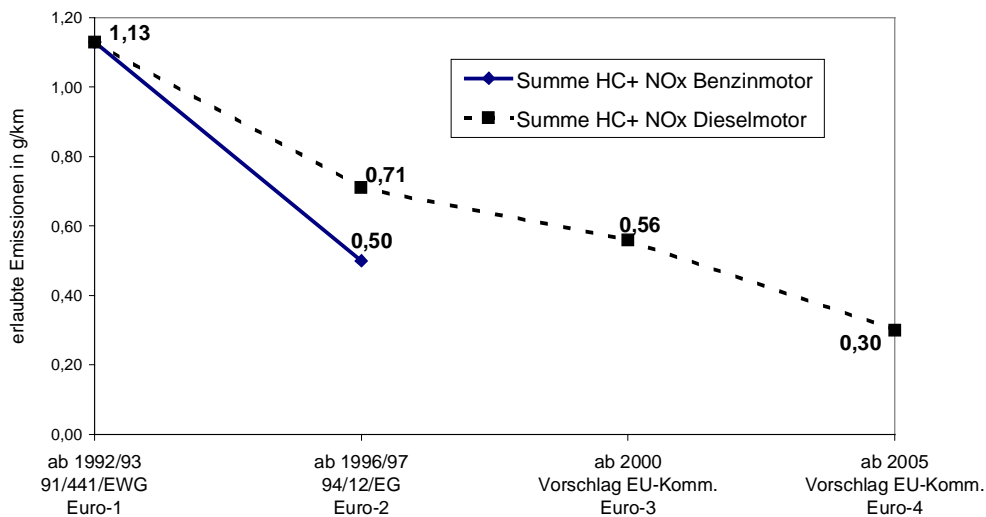


Abbildung 1-10: Abgasgrenzwerte für die Serienproduktion von Pkw: Kohlenwasserstoffe + Stickstoffoxide (g/km) [Quelle: Umweltbundesamt Jahresbericht 1996] (korrigierte Werte entspr. dem Wegfall der 40 s Leerlauf zu Beginn des Zyklus)

Für die schweren Lastkraftwagen haben sich die Umweltminister der EU im Dezember 1998 auf die vom Europaparlament geforderten strengen Grenzwerte geeinigt. So wurden für die Zukunft so strenge Grenzwerte für Rußpartikel und Stickoxide festge-

legt, dass diese nur mit Hilfe von Nachbehandlungstechniken realisiert werden können. In spätestens zehn Jahren dürften demnach in Europa auch Lkw nur noch mit Katalysator verkauft werden.

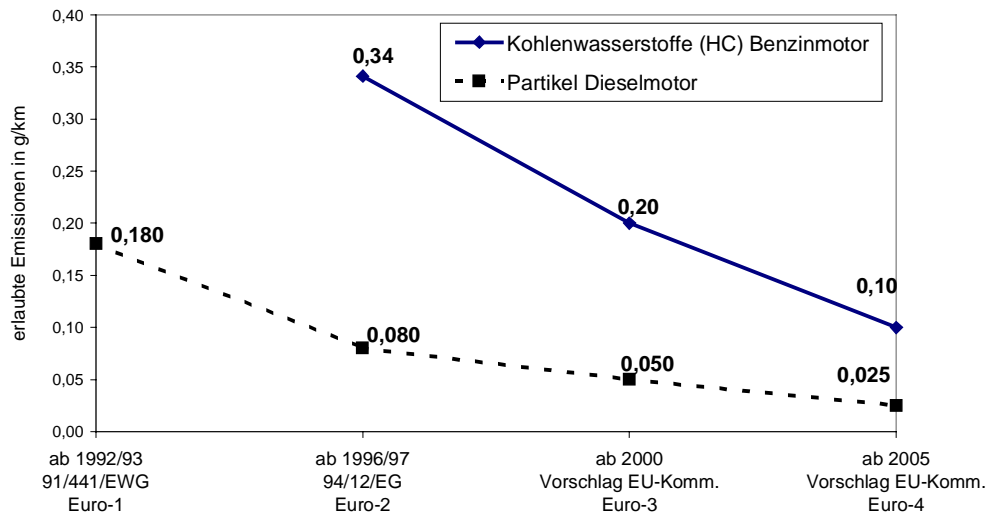


Abbildung 1-11: Abgasgrenzwerte für die Serienproduktion von Pkw: Kohlenwasserstoffe und Partikel (g/km) [Quelle: Umweltbundesamt Jahresbericht 1996] (korrigierte Werte entspr. dem Wegfall der 40 s Leerlauf zu Beginn des Zyklus)

Im einzelnen sehen die Vorschläge des Rates folgendes vor: Der heutige Grenzwert "Euro 2" für schwere Nutzfahrzeuge (über 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht) wird zum 1. Oktober 2000 um 30% verschärft (neue Werte "Euro 3":  $\text{NO}_x$  5 g / kWh, Partikel 0,1 g / kWh). Zum 1. Oktober 2005 tritt eine weitere Verschärfung auf "Euro 4" ein mit Werten für  $\text{NO}_x$  von 3,5 g / kWh und für Partikel von 0,02 g / kWh. Diese Werte sind nur mit einem Partikelfilter zu erzielen. Zum 1. Oktober 2008 ("Euro 5") wird in einer 3. Stufe der Stickoxidwert auf 2,0 g / kWh und der Partikelwert auf 0,02 g/kWh gesenkt, wozu ebenfalls eine Nachbehandlungstechnik (deNO<sub>x</sub>-Katalysator) benötigt wird.

Dieser Fahrplan der Umweltminister bedarf zu seiner Wirksamkeit der Zustimmung durch das Europäische Parlament, das sich für eine schnellere Umsetzung dieser Grenzwerte schon bis zum Jahre 2005 ausgesprochen hat.

Am 1. März 1997 trat die 23. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) in Kraft, die Städte und Gemeinden verpflichtet, zu prüfen, wie die Schadstoffbelastungen vermindert werden können, wenn in Straßennähe bestimmte Grenzwerte überschritten werden. Sie legt Schwellenwerte für Stickstoffoxide, Ruß und Benzol fest. Für die beiden letzteren gelten ab dem 1. Juli 1998 strengere Werte. Der Rußwert wird auf  $8 \mu\text{g} / \text{m}^3$  und der Benzolwert auf  $10 \mu\text{g} / \text{m}^3$  herabgesetzt.

## 1.4 Vorhersage der Verkehrsemissionen in Deutschland

Im Auftrag des Umweltbundesamtes berechnete das IFEU-Institut 1998 den Verlauf der Hauptverkehrsemissionen in Deutschland mit Hilfe des Computerprogramms "TREMOD" (Traffic Emission Estimation Model). In der Zeitreihe von 1980 bis 1996 und anschließend in Szenarien bis 2020 wurden für jedes Jahr die direkten Emissionen verschiedener Fahrzeugkategorien berechnet.

**Ergebnisse** (dargestellt in den folgenden Abbildungen): Trotz einer weiteren Zunahme der Fahrleistungen nehmen die direkten Emissionen der Stickstoffoxide und der Dieselrußpartikel langsam, die der Kohlenwasserstoffe und von Benzol rasch gegenüber ihrem jeweiligen Höchststand Ende der 80er bzw. Anfang der 90er Jahre ab. Die Emissionen an Kohlendioxid dagegen steigen bis zum Jahr 2010 weiter an, um dann auf konstantem Niveau zu bleiben.

**Legende** für alle Abbildungen: Ergebnisse von TREMOD (Traffic Emission Estimation Model), erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin (UFOPLAN-Nr. 10506057). Version 3. Sept. 1998.

"Szenario": Werte nach 1996, Fahrzeug-Fahrleistungsvorhersage nach ifo-Institut, München 1995;

Abschätzung der Emissionen mit folgenden Parametern: neue Autos ab 1996-1999 mit EURO-2 Standard, ab 1997-2000 mit Euro-3 Standard und ab 2002-2005 mit EURO-4 Standard;

Verbesserung der Kraftstoffqualität 1999-2005 berücksichtigt; direkte Emissionen einschließlich der Verdampfungsemissionen.

PC: passenger cars (Pkw); Other Gasoline Veh.: leichte und Zweiräder; Other Diesel Veh.: leichte und schwere Nutzfahrzeuge und Busse. Die Grenzwertstufen EURO-4 und 5 bei den schweren Nutzfahrzeugen sind noch nicht berücksichtigt [IFEU-Institut Heidelberg, 3. September 1998].



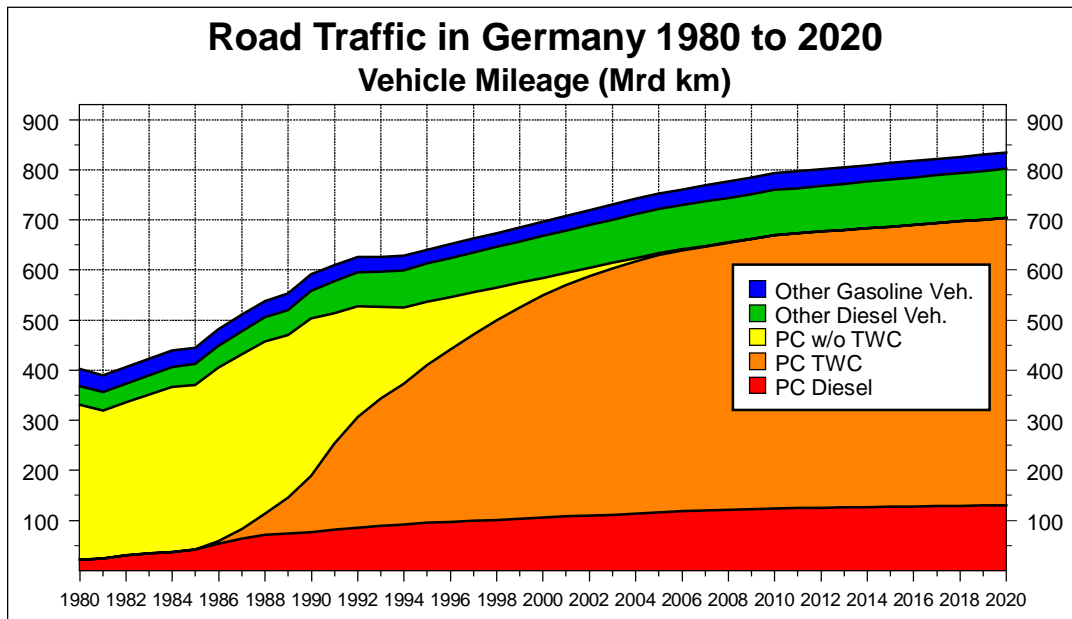


Abbildung 1-12: Verlauf der Fahrleistungen im Straßenverkehr in Deutschland von 1980 bis 2020, berechnet mit TREMOD [Einheit: Mrd km]

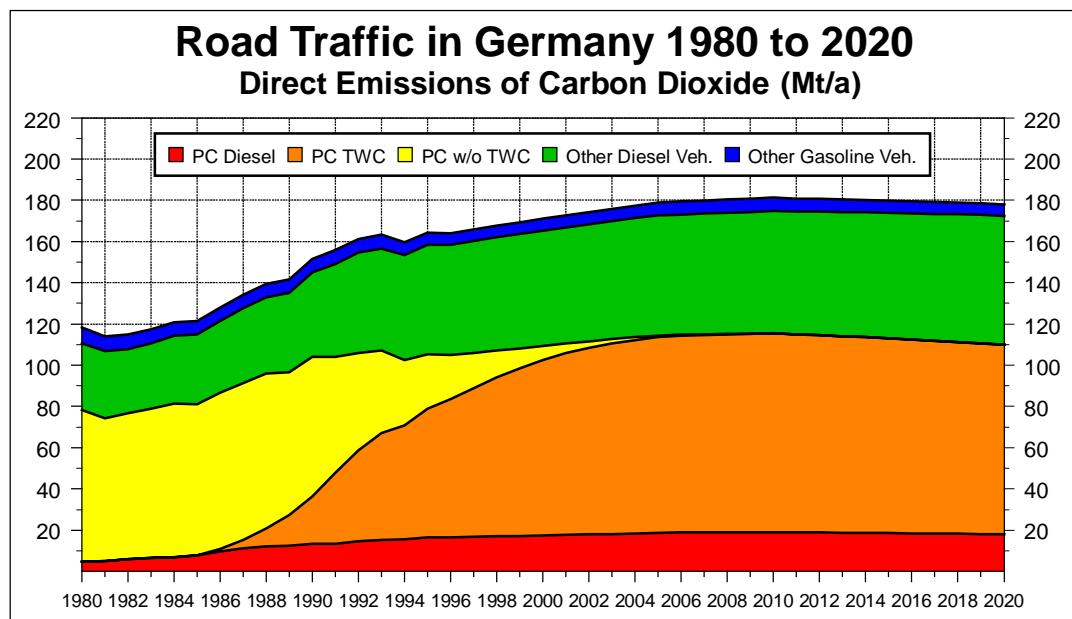


Abbildung 1-13: Verlauf der direkten Emissionen an Kohlendioxid im Straßenverkehr in Deutschland von 1980 bis 2020, berechnet mit TREMOD [Einheit: Mio t/a]

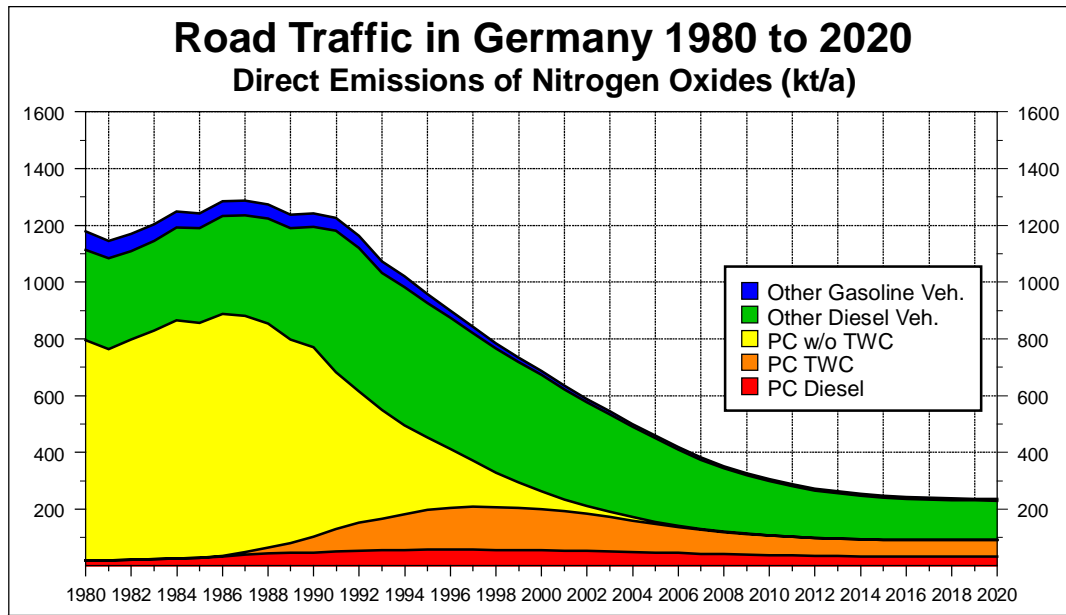


Abbildung 1-14: Verlauf der direkten Emissionen an Stickstoffoxiden im Straßenverkehr in Deutschland von 1980 bis 2020, berechnet mit TREMOD [Einheit: kt/a]

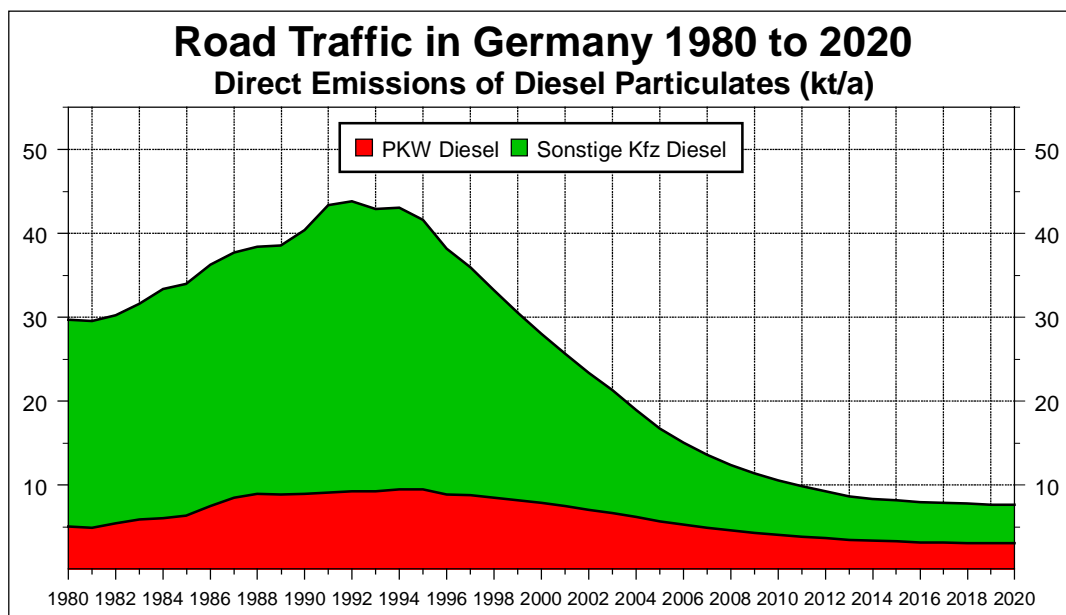


Abbildung 1-15: Verlauf der direkten Emissionen an Dieselrußpartikeln im Straßenverkehr in Deutschland von 1980 bis 2020, berechnet mit TREMOD [Einheit: kt/a]

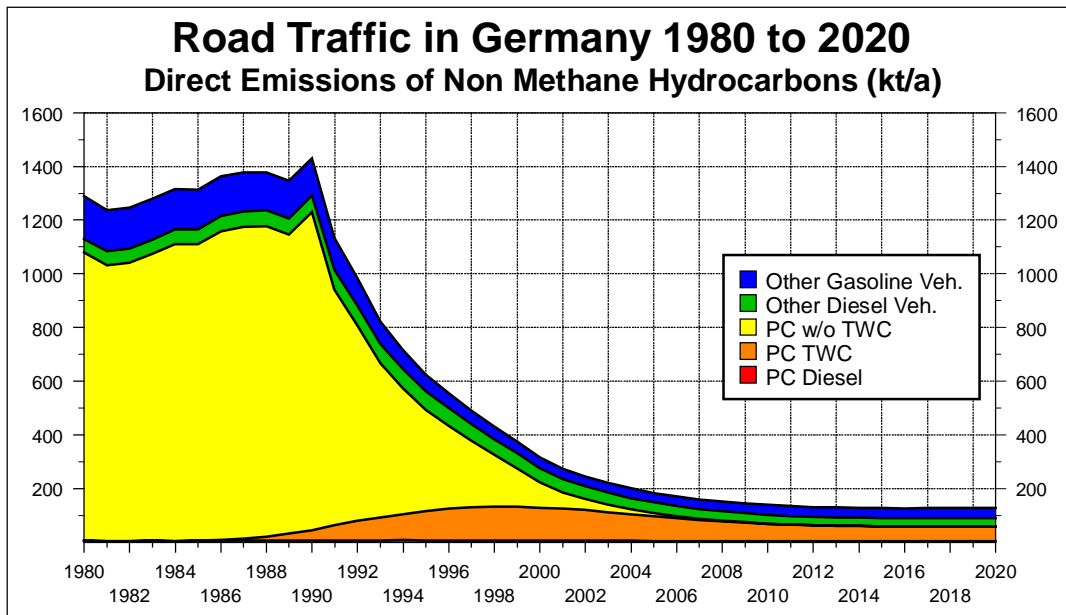


Abbildung 1-16: Verlauf der direkten Emissionen an Kohlenwasserstoffen (ohne Methan) im Straßenverkehr in Deutschland von 1980 bis 2020, berechnet mit TREMOD [Einheit: kt/a]

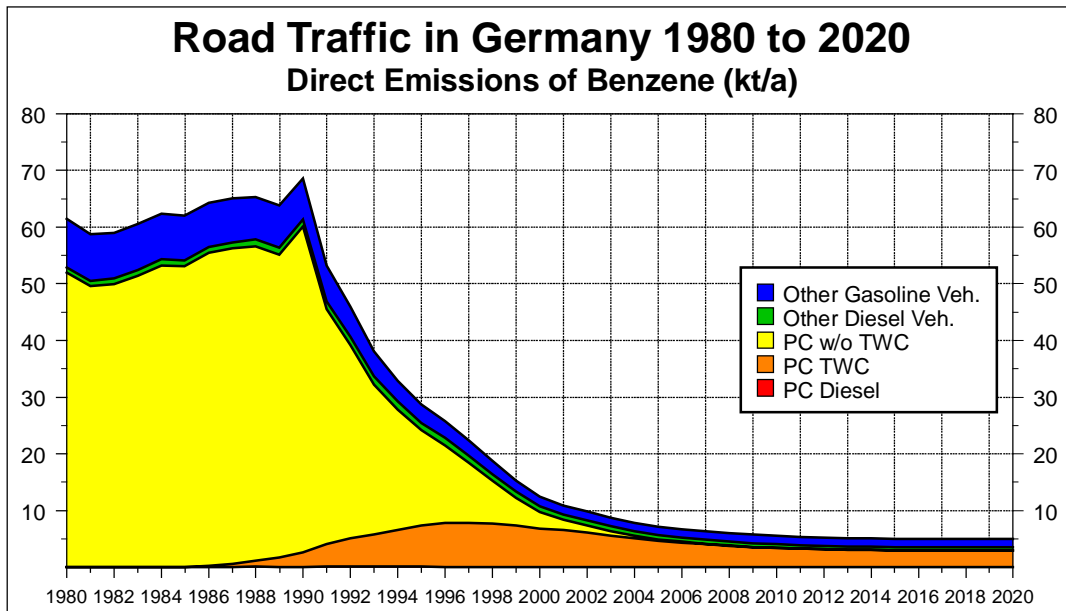


Abbildung 1-17: Verlauf der direkten Emissionen an Benzol im Straßenverkehr in Deutschland von 1980 bis 2020, berechnet mit TREMOD [Einheit: kt/a]

## 1.5 Wirkungen von Verkehrsemissionen

Im folgenden werden die wichtigsten, heute bekannten Wirkungen stofflicher Emissionen aus dem Verkehrsbereich auf menschliche Gesundheit und natürliche Umwelt kurz aufgeführt. Da viele Umwelt- und Gesundheitseffekte mit Zeitverzögerung auftreten, darf vermutet werden, dass auch heute noch unbekannt oder nicht für wichtig gehaltene Langzeitwirkungen unseres Verkehrssystems auftreten werden. Demzufolge erhebt diese Liste keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Des weiteren nicht behandelt werden ökonomische Schäden durch Luftverschmutzung oder Verkehrsunfälle und direkte, physikalische Wirkungen des Verkehrs wie Lärm, Verletzungen, Todesfälle, Flächenverbrauch, Habitatsfragmentierung, etc.

### 1.5.1 Humantoxikologie

#### 1.5.1.1 Akute Wirkungen

- **Atemwegserkrankungen**  
durch  $\text{NO}_x$  und feine Partikel (PM10)  
[BUWAL 1996, Brauer & Hisham-Hashim 1998]
- **Lungenfunktionsstörungen, Entzündungen**  
durch Photooxidantien incl. Ozon  
[Höppe 1997]

#### 1.5.1.2 Chronische Wirkungen

- **Krebs** (v. a. Lungenkrebs und Leukämie)  
durch Benzol, Dieselrußpartikel, PAK, Nitro-PAK [MAK-Liste 1999]

Berechnungen haben ergeben, dass durch die Emission von Dieselruß und Benzol aus Kraftfahrzeugabgasen in der Bundesrepublik Deutschland pro Jahr ca. 8.700 Todesfälle durch Lungenkrebs verursacht werden. Das Risiko, an vielbefahrenen Hauptstraßen einen tödlich verlaufenden Lungenkrebs durch Kraftfahrzeugabgase zu entwickeln, beträgt heute 1 zu 40 [Teufel et al. 1998]. Zum Vergleich: 1996 wurden im deutschen Straßenverkehr 8.758 Menschen durch Verkehrsunfälle getötet. Für das Jahr 1999 beläuft sich diese Zahl auf 7.749 Tote, bei 521.000 Verletzten und insgesamt 2.4 Mio. Verkehrsunfällen (Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 22.02.2000) Bundesweit waren 1999 50.5 Millionen Kraftfahrzeuge registriert. Es kommen somit gleich viele Men-

schen durch verkehrsbedingten Lungenkrebs wie durch Unfälle auf deutschen Straßen ums Leben. Etwa jeder zehnte Lungenkrebs wird vom Verkehr verursacht.

### 1.5.2 Ökotoxikologie

- **Phytotoxische** Effekte  
durch Photooxidantien incl. Ozon, Ethen
- Toxische Effekte auf **aquatische** Lebewesen  
durch Schwermetalle, PAK, MTBE

### 1.5.3 Treibhauseffekt

Durch den motorisierten Verkehr werden verschiedene Gase freigesetzt, denen ein klimawirksames Potential zugeordnet wird. Er trägt somit zu einem erheblichen Teil zur Erwärmung der Erdatmosphäre bei.

- **Kohlendioxid**,  $\text{CO}_2$  (Von der Menge her am bedeutendsten.)
- **Methan**,  $\text{CH}_4$
- **Distickstoffmonoxid** (Lachgas),  $\text{N}_2\text{O}$  (Besitzt ein sehr hohes Treibhauspotential. Photochemische Prozesse bauen  $\text{N}_2\text{O}$  im wesentlichen erst in der Stratosphäre ab.)
- **Wasserdampf**,  $\text{H}_2\text{O}$  (Vor allem der in Form von Kondensstreifen auftretende Wasserdampf aus Flugzeugen ist sehr klimawirksam.)
- **Ozon**,  $\text{O}_3$  (Der Flugverkehr führt zu einer Erhöhung der klimawirksamen Ozonkonzentration in der Tropopause [Schumann 1999].)

### 1.5.4 Bildung bodennahen Ozons

Die Emissionen des Verkehrs an Stickstoffoxiden und organischen Verbindungen tragen bei Sonneneinstrahlung zur Bildung von Photosmog mit der Hauptkomponente Ozon ( $O_3$ ) bei. Folgen sind die Belastung der menschlichen Gesundheit, v. a. der von ozonempfindlichen Personen, sowie ein möglicher Rückgang des Ernteertrags in der Landwirtschaft.

Flüchtige organische Verbindungen stellen zusammen mit  $NO_x$  die wichtigsten Vorläufer für die Bildung von Photooxidantien dar. Die aus Automobilabgasen stammenden Alkane, Alkene, Alkine, aromatischen Kohlenwasserstoffe, Aldehyde und Ketone sind hieran ebenso beteiligt wie organische Verbindungen biogenen Ursprungs (z. B. Isopren, Terpene).

Beim Abbau dieser flüchtigen organischen Verbindungen kommt es zur Bildung von Radikalen ( $R^*$ ,  $RCO^*$ ,  $RO^*$ , ...), die photochemischen Kettenreaktionen unterliegen. Die Umwandlung von  $NO$  zu  $NO_2$  und dessen lichtabhängige Spaltung zu  $NO$  und atomarem Sauerstoff  $O(^3P)$ , der dann mit  $O_2$  zu  $O_3$  reagiert, und  $O_3$  stellen quasi den Motor dieser Radikalkettenreaktionen dar; die hierfür erforderliche Energiequelle ist das Sonnenlicht (s. Abbildung 1-18).

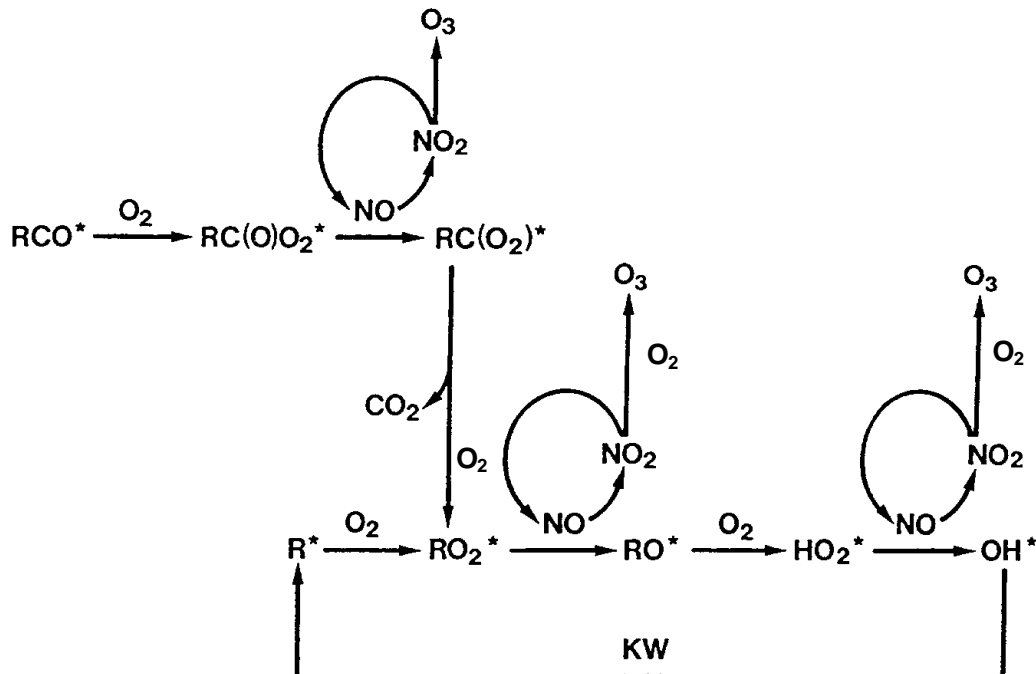


Abbildung 1-18: Photochemische Bildung von Ozon [aus Lenz et al. 1993]

Von besonderem Interesse ist, welche der in die Luft gelangenden organischen Verbindungen in die luftchemischen Prozesse, vor allem in die Ozonbildung, eingreifen. Die einzelnen VOC-Substanzen tragen mit unterschiedlicher Effektivität und unterschiedlicher (Reaktions-)Geschwindigkeit zur Ozonbildung bei. Je nach Geschwindigkeit der Reaktion mit OH-Radikalen beeinflussen sie vor allem die regionale oder lokale Ozonbildung.

Der Beitrag einzelner VOC-Substanzen an der regionalen Bildung des bodennahen Ozons lässt sich anhand von Ozonbildungspotentialen (POCP für "photochemical ozone creation potentials") vergleichen. Je höher der POCP-Wert einer Substanz oder Substanzgruppe ist, um so bedeutender ist ihr Einfluss auf die Ozonbildung. Alkene/Diene sowie die sonstigen Aromaten tragen demnach besonders effektiv zur Ozonbildung bei.

VOC-Substanz oder -Substanzgruppe	Ozonbildungspotential (POCP-Werte)
Methan	1
Sonstige Alkane	25 bis 50
Ethen	100 *
Sonstige Alkene/Diene	50 bis 110
Ethin	15
Benzol	20
Alkylierte Aromaten	50 bis 120
Formaldehyd	40
Sonstige Aldehyde/Ketone	50 bis 70

Tabelle 1-6: POCP-Werte für VOC-Substanzen oder Substanzgruppen [LfU 1996]  
(\*: per Definition)

Die Bedeutung einzelner Quellgruppen im Hinblick auf die Ozonbildung kann anhand der Anteile an den Emissionen gewichtet mit den POCP-Werten abgeschätzt werden. Der VOC-Beitrag des Verkehrs zur regionalen Ozonbildung beträgt 37%, zur lokalen Ozonbildung 31% [LfU 1996].

### 1.5.5 Eutrophierung

Die Stickoxidemissionen aus Verbrennungsmotoren führen zu einer erhöhten Nitratstoffdeposition und dadurch zu einer Düngung von Böden und Gewässern. Die damit verbundene Schädigung von Ökosystemen erfolgt über verschiedene Wege:

- Nährstoff-Ungleichgewichte, z. B. im Waldboden
- Verdrängung von Arten an N-limitierten Standorten
- erhöhte Anfälligkeit auf sekundäre Stressfaktoren (z. B. Sturmschäden aufgrund überhöhter Wachstumsraten)
- die Mineralisierung von Stickstoffverbindungen führt zudem zu einer Versauerung (s. u.)

### 1.5.6 Versauerung

Der Verkehr trägt heute ganz überwiegend durch die Emissionen von Stickstoffoxiden und nur noch zu einem kleinen Teil durch Schwefeldioxidemissionen zur Versauerung von Niederschlägen, Böden und Gewässern bei. Die Säuredeposition übersteigt kritische Eintragsraten. Der Verkehr hat einen Anteil an den gesamten  $\text{NO}_x$ -Emissionen von rund 80 %.

Während des Ausbreitungsvorgangs von  $\text{NO}_x$  in der Atmosphäre finden eine Vielzahl komplexer chemischer und photochemischer Reaktionen statt, die u. a. auch zur Bildung von säurehaltigen Niederschlägen führen. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Prozesse der Säurebildung aus  $\text{NO}_x$  in der Atmosphäre ist in Abbildung 1-19 dargestellt.



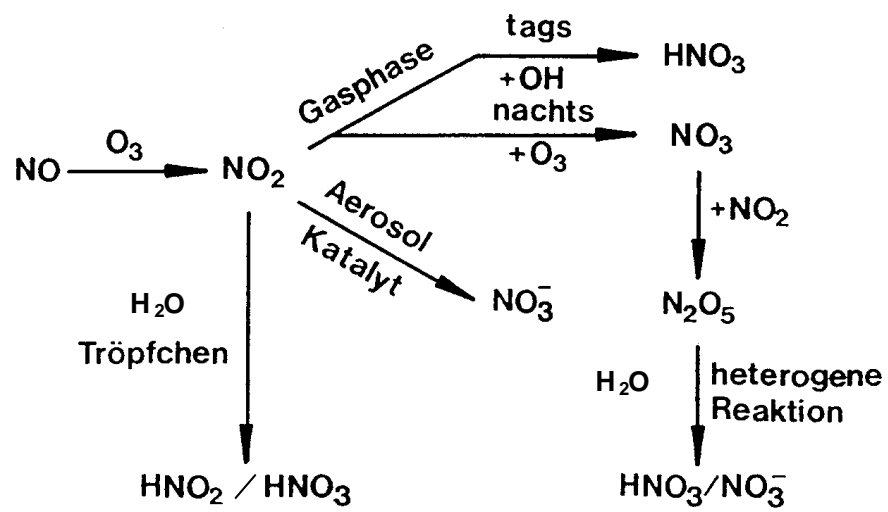


Abbildung 1-19: Atmosphärische Prozesse der Säurebildung aus NO<sub>x</sub>  
[aus Lenz et al. 1993]

### 1.5.7 Ozonabbau in der Stratosphäre

Die stratosphärische Ozonschicht schützt Mensch und Natur vor der energiereichen UV-B-Strahlung. Die auch in der Nordhemisphäre beobachtete Schwächung der Ozonschicht gefährdet die Gesundheit des Menschen; daneben wurden Schäden an Pflanzen und an marinem Plankton festgestellt.

- **Halogenierte Kohlenwasserstoffe:** Rund die Hälfte aller Autos weltweit ist heute mit Klimaanlage ausgerüstet, und 31 % der weltweit verwendeten FCKW-Kühlmittel werden in mobilen Klimaanlagen eingesetzt. Zwar besteht für FCKW in Deutschland ein Produktionsverbot; es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die ebenfalls ozonschichtschädigenden H-FCKW importiert und im Verkehr eingesetzt werden.
- **Flugverkehr:** Nach dem heutigen Stand des Wissens trägt der globale Flugverkehr nicht zur Ausdünnung der stratosphärischen Ozonschicht bei [Schumann 1999].

## 2 Organische Emissionen des Straßenverkehrs – ein Überblick

Etwa 200 Literaturstellen wurden für diesen Arbeitsbericht im Hinblick auf Emissionsfaktoren von Straßenkraftfahrzeugen ausgewertet. Die Einzelergebnisse sind tabellarisch im nächsten Kapitel (Kapitel 3) dargestellt. In diesem Kapitel wollen wir einen Überblick über die Klassen organischer Stoffe geben, die von Kfz emittiert werden.

Stoffklasse	Emissionsfaktoren in mg/km				Reduktion durch G-Kat	
	Pkw mit G-Kat	Pkw ohne G-Kat	Diesel-Pkw	Diesel-Lkw	um... %	auf... %
Azyklische, gesättigte KW	91,4	424	12,5	215	78	22
Azyklische, ungesättigte KW	44,7	409	38,7	114	89	11
Monozyklische aromatische KW	65,6	509	8,2	71,9	87	13
Polyzykl. Aromatische KW (PAK)	0,015	0,1	0,1	0,2	89	11
Alkylierte PAK	0,6	10,9	1,0	2,7	95	5
<b>Summe Kohlenwasserstoffe</b>	<b>202</b>	<b>1.350</b>	<b>60</b>	<b>404</b>	<b>85</b>	<b>15</b>
Azyklische und zyklische Alkohole	5,1	6,1	11,0	84,4	17	83
Aromatische Hydroxyverbindungen	6,1	23,1	20,5	84,4	74	26
Azyklische Aldehyde	10,9	139	108	378	92	8
Aromatische Aldehyde	2,8	44,4	15,4	60,3	94	6
Aromatische Ketone	1,8	18,3	11,7	30,3	90	10
Carbonsäuren	0,66	0,05	0,05	0,96	-	1.323
<b>Summe oxidierte Verbindungen</b>	<b>27</b>	<b>231</b>	<b>167</b>	<b>639</b>	<b>88</b>	<b>12</b>
N-haltige Verbindungen	0,6	3,2	1,1	0,042	81	19
<b>Gesamtsumme (Kohlenwasserstoffe + oxidierte Verbindungen)</b>	<b>230</b>	<b>1.587</b>	<b>228</b>	<b>1.042</b>	<b>85</b>	<b>15</b>

Tabelle 2-1: Emissionen organischer Stoffgruppen von Straßenkraftfahrzeugen (summierte Emissionsfaktoren in mg/km)

Zählt man alle verfügbaren Zahlenangaben über Emissionsfaktoren organischer Verbindungen zusammen, ergibt sich das in Tabelle 2-1, Abbildung 2-1, Abbildung 2-2, und Abbildung 2-3 gezeigte Bild. Zu beachten ist hierbei, dass es sich ausschließlich um Emissionsfaktoren im warmen Betriebszustand handelt. Kaltstart-Emissionen, "standing losses", Verluste beim Tanken, etc. wurden nicht berücksichtigt.

Diesel-Pkw und Pkw mit G-Kat haben mit etwa 230 mg/km die geringsten Gesamtemissionen an organischen Verbindungen. Das sind 85 % weniger als Pkw ohne Katalysator und 78 % weniger als Diesel-Lkw. Hierbei sind Rußpartikel nicht berücksichtigt.

Unterscheidet man zwischen reinen Kohlenwasserstoffverbindungen und oxidierten Verbindungen (Tabelle 2-1, Abbildung 2-1), fällt auf, dass bei den Diesel-Fahrzeugen die oxidierten Verbindungen überwiegen, während bei den Pkw mit Ottomotor die nicht oxidierten Verbindungen um ein Vielfaches höher liegen. Dabei verändert der Katalysator dieses Verhältnis nicht wesentlich.

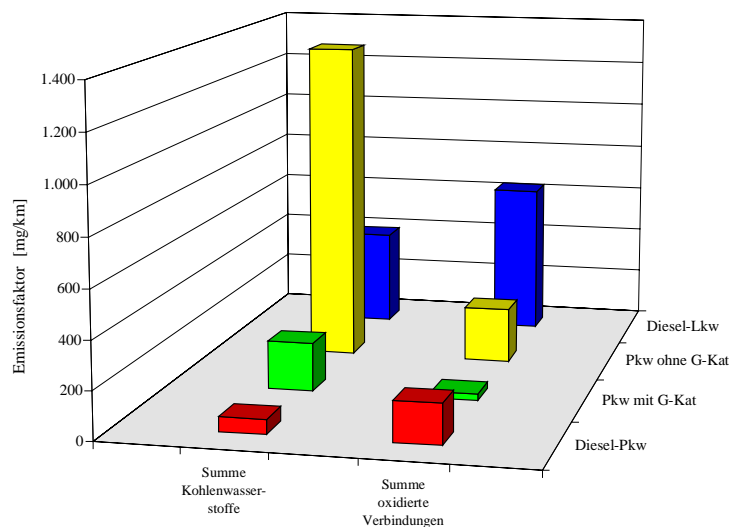


Abbildung 2-1: Durchschnittliche Gesamtemissionen an Kohlenwasserstoffen und oxidierten Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in mg/km)

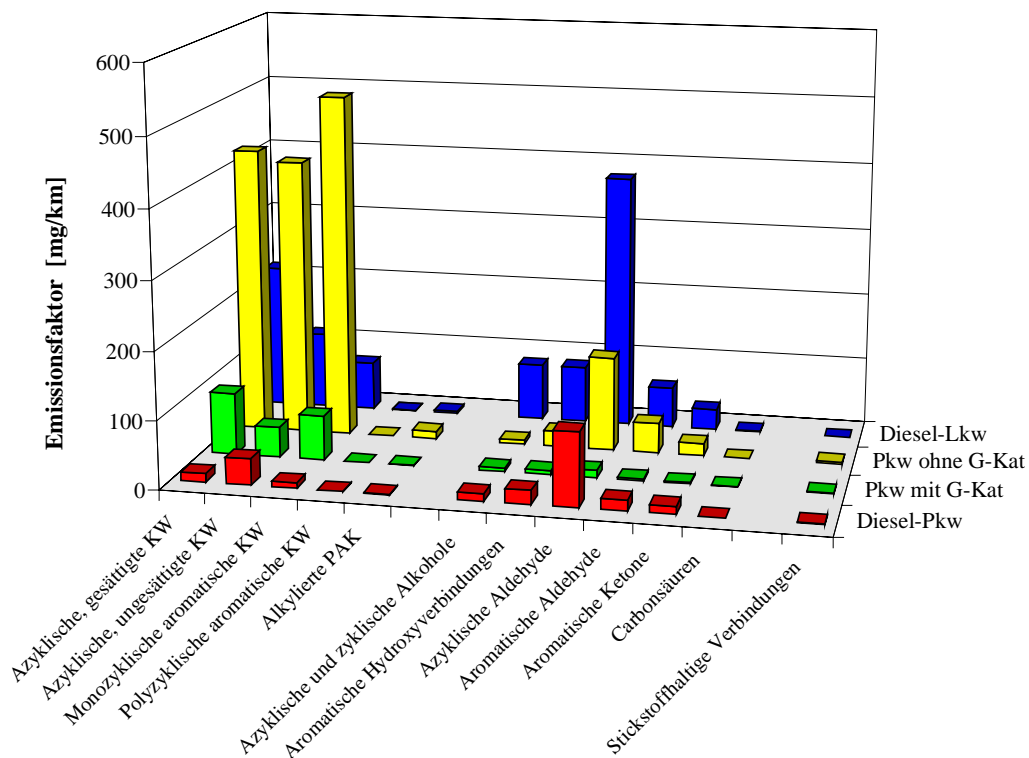


Abbildung 2-2: Durchschnittliche Emissionen an organischen Verbindungsklassen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km)

Bei genauerer Betrachtung der einzelnen Verbindungsklassen (Abbildung 2-2) wird dieses Bild bestätigt. Benzin-betriebene Pkw emittieren überwiegend Alkane, Alkene und monozyklische Aromaten, während bei den Diesel-Fahrzeugen mehr oxidierte Verbindungen, hier vor allem azyklische Aldehyde emittiert werden.

In Abbildung 2-3 sind alle Emissionsfaktoren auf Pkw ohne G-Kat normiert. Es wird deutlich, dass der Einsatz eines 3-Wege-Katalysators die Emissionen aller Verbindungsklassen reduziert, außer bei den Alkoholen, die nicht vermindert werden, und außer bei den organischen Säuren, die durch den Katalysator offensichtlich erst produziert werden. Die Emissionsfaktoren liegen hier im Schnitt um das 13-fache höher als bei Autos ohne Katalysator.

Diesel-Fahrzeuge haben im Vergleich zu Pkw ohne Katalysator höhere Emissionen an oxidierten Verbindungen, v. a. an Alkoholen und bei den Lkw besonders an organischen Säuren.

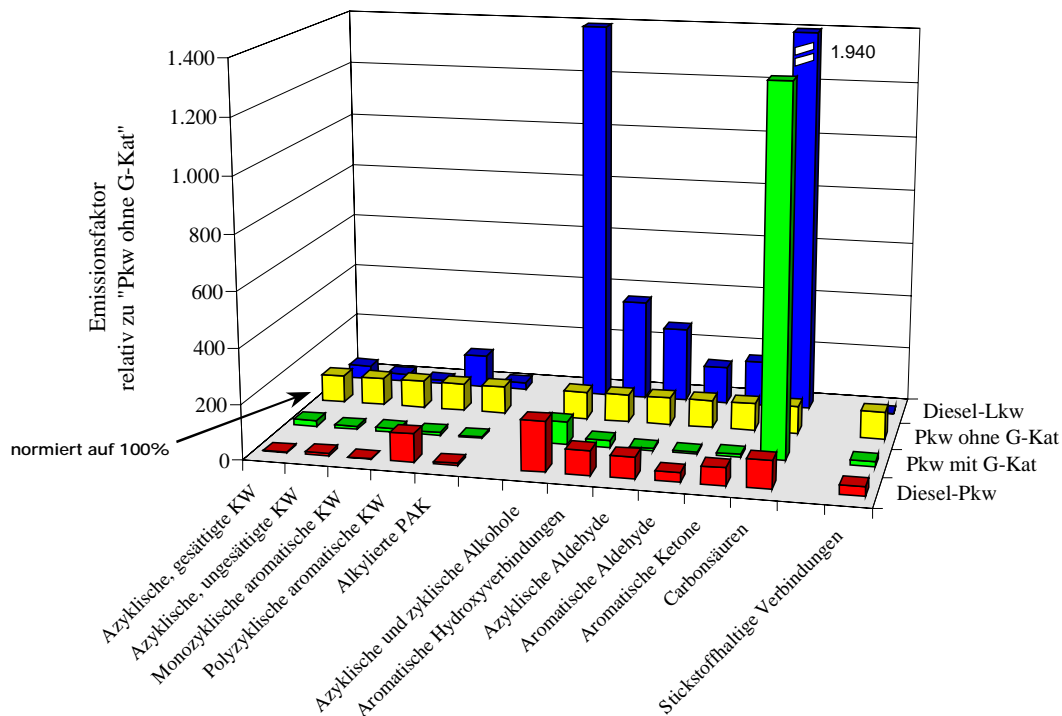


Abbildung 2-3: Durchschnittliche Emissionen an organischen Verbindungsklassen von Straßenkraftfahrzeugen (normiert auf die Emissionsfaktoren von Pkw ohne G-Kat)

In Abbildung 2-4, Abbildung 2-5, Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7 ist die durchschnittliche Zusammensetzung der organischen Abgasemissionen der vier verschiedenen Fahrzeugklassen dargestellt. Entscheidend für die Komposition ist offensichtlich die Motorenart, weniger die Art des Fahrzeugtyps (Pkw oder Lkw) oder die Abgasreinigungstechnik.

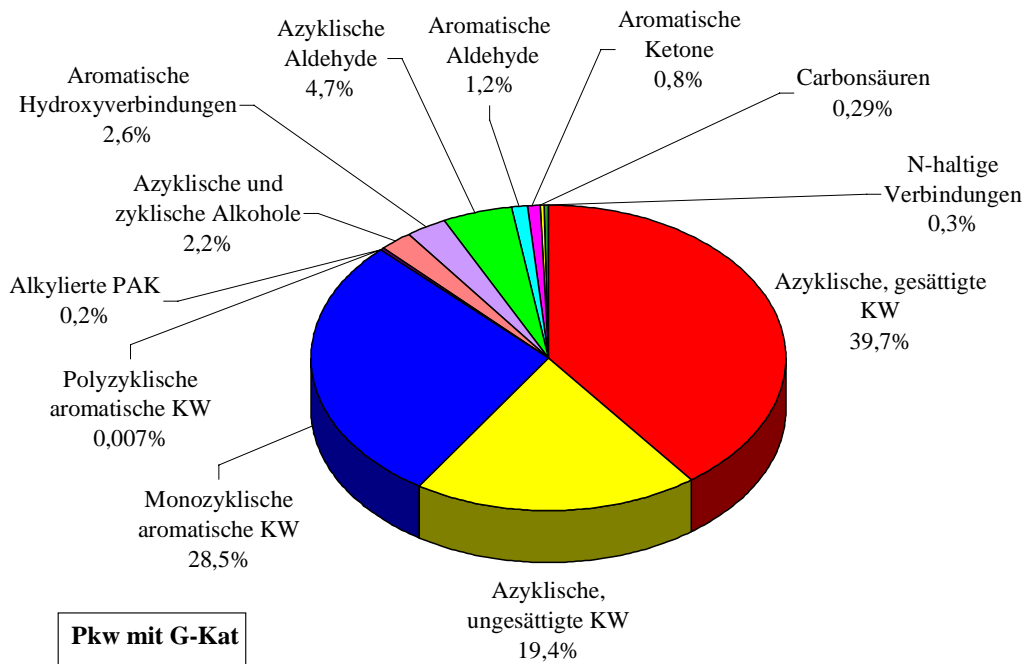


Abbildung 2-4: Durchschnittliche Zusammensetzung der organischen Emissionen von Pkw mit geregelterm Abgaskatalysator

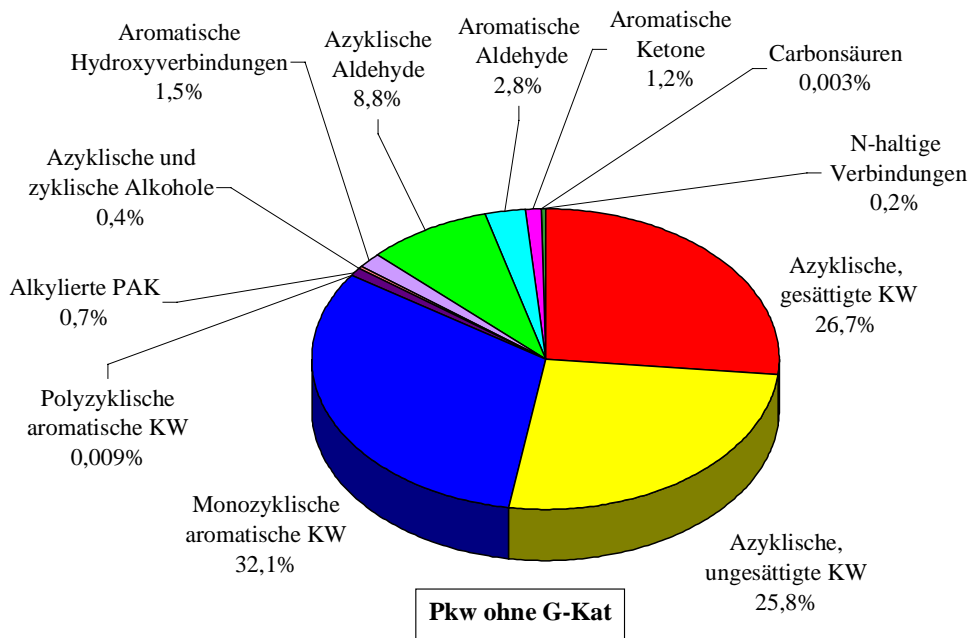


Abbildung 2-5: Durchschnittliche Zusammensetzung der organischen Emissionen von Pkw ohne geregelterm Abgaskatalysator

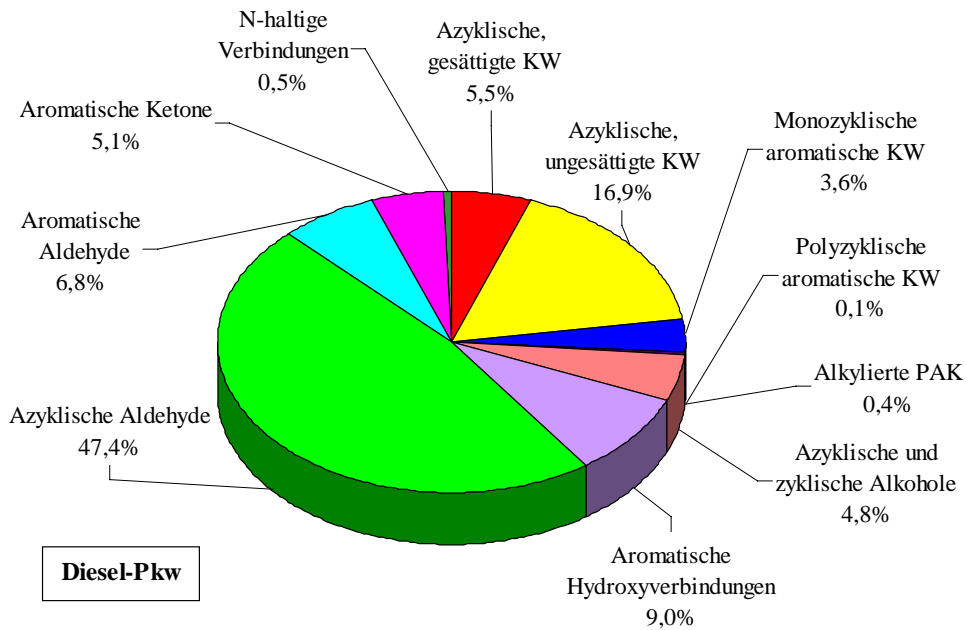


Abbildung 2-6: Durchschnittliche Zusammensetzung der organischen Emissionen von Pkw mit Dieselmotor

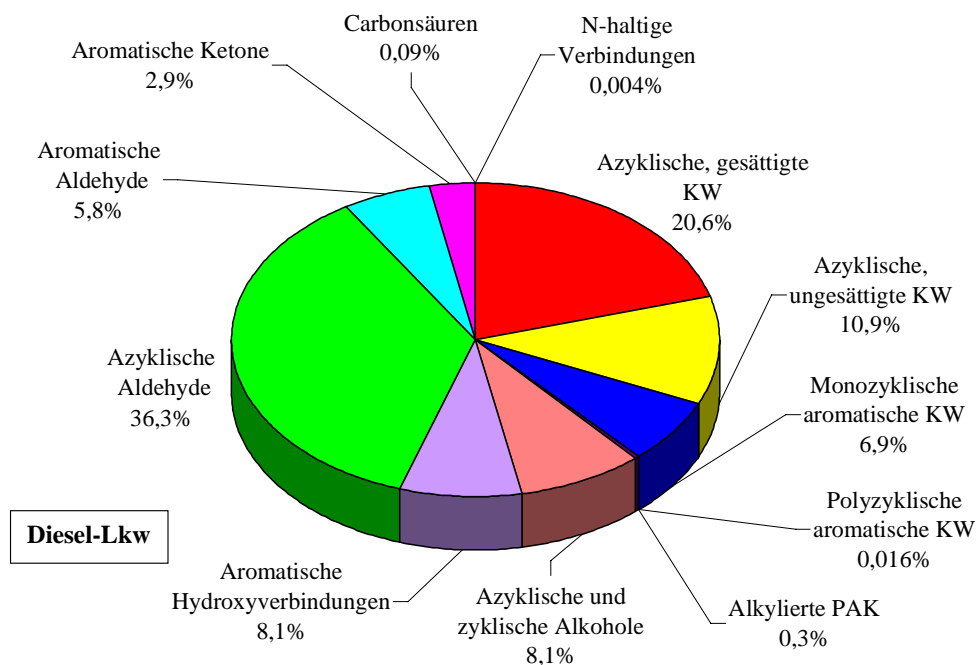


Abbildung 2-7: Durchschnittliche Zusammensetzung der organischen Emissionen von Lkw (mit Dieselmotor)