

3 Emissionen von Einzelstoffen aus dem Straßenverkehr

3.1 Hinweise zum Lesen der Tabellen in diesem Kapitel

1. Etwa 200 Literaturstellen wurden für diesen Arbeitsbericht im Hinblick auf Emissionsfaktoren von Straßenkraftfahrzeugen ausgewertet. Die Einzelergebnisse sind in den folgenden Tabellen dargestellt. Es handelt sich ausschließlich um Emissionsfaktoren im warmen Betriebszustand; Kaltstart-Emissionen, "standing losses", Verluste beim Tanken, etc. wurden nicht berücksichtigt. Wichtiger als die quantitativen Angaben, die sehr stark schwanken können, war die Klärung der **Identität** der Substanzen, die in Motor-Verbrennungsabgasen nachgewiesen werden können. Die Einteilung der Fahrzeugkategorien erfolgt grob in Pkw mit und ohne 3-Wege-Katalysator, Diesel-Pkw und Diesel-Lkw.
2. Wurde eine Substanz nur qualitativ nachgewiesen, so ist dies durch das Kürzel "nachgew." dargestellt.
3. Wurde eine Substanz quantitativ bestimmt und in manchen Veröffentlichungen nur qualitativ, d. h. ohne Zahlenangabe, beschrieben, so wurden in dem Quellenverzeichnis nur die Veröffentlichungen zitiert, in denen quantitative Angaben zu finden waren.
4. Waren höchstens zwei Veröffentlichungen mit quantitativen Emissionsfaktoren (EF) einer Substanz vorhanden, so wurde aus den beiden Werten der Mittelwert gebildet und dieser gemäß folgendem Schema auf oder abgerundet:

$0,75 < EF < 2,5$	→ 1
$2,5 < EF < 7,5$	→ 5
$7,5 < EF < 25$	→ 10
$25 < EF < 75$	→ 50
$75 < EF < 250$	→ 100
$250 < EF < 750$	→ 500
$750 < EF < 2.500$	→ 1.000
$2500 < EF < 7500$	→ 5.000
$7.500 < EF < 25.000$	→ 10.000
$25.000 < EF < 75.000$	→ 50.000
usw.	

5. Zahlreiche quantitative Emissionsfaktoren wurden aus der NOREM-Datenbank gewonnen [Norem 1998]. Diese wurde wie folgt ausgewertet. Waren in NOREM mehr als 7 Emissionsfaktoren für eine Substanz aufgeführt, so wurde aus diesen der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet und diese exakt in die Tabelle übernommen. Waren weniger als 7 Werte aufgeführt, so wurde ebenso der Mittelwert gebildet, dieser aber gemäß 4. auf- bzw. abgerundet.
6. In vielen Fällen waren neben den NOREM-Werten noch weitere Emissionsfaktoren aus verschiedenen Veröffentlichungen vorhanden. In diesem Fall wurden die exakten NOREM-Werte aus mehr als 7 Einzelwerten unverändert gelassen, die Quellen der anderen EF wurden zusätzlich angegeben, wenn die Werte im Bereich der NOREM-Werte lagen. Übertraf der EF einer Substanz aus einer zusätzlichen Quelle den Bereich des NOREM-Wertes deutlich, so wurde dieser extra aufgenommen und mit dem Zusatz "Max.", für Maximalwert versehen. War der NOREM-Wert aus weniger als 7 Einzelwerten gebildet worden, so wurde aus diesen und den Werten aus den verschiedenen Veröffentlichungen der Mittelwert und die Mittelabweichung gebildet und diese exakt in die Tabelle aufgenommen, die Quellen wurden alle aufgeführt.
7. Verschiedene Quellen geben die Emissionsfaktoren in g/mile an. Diese wurden auf g/km umgerechnet. Die Emissionsfaktoren, die in g/l angegeben waren, wurden unter der Annahme eines Kraftstoffverbrauchs von 10l/100km ebenso in g/km umgerechnet.

3.2 Kohlenwasserstoffverbindungen

3.2.1 Azyklische, gesättigte Kohlenwasserstoffe

Alkane gehören zu den Hauptemissionen organischer Verbindungen aus Kraftfahrzeugen. Sie stammen überwiegend aus unverbranntem Benzin. Rund 0,1% des Gesamtvolumenanteils im Abgas von Ottomotoren sind unverbrannte Kohlenwasserstoffe. Der Alkan-Anteil an den HC-Emissionen im Rohabgas ist jedoch deutlich geringer als im Kraftstoff. Im Durchschnitt erreicht ein Abgaskatalysator eine Reduktion der Alkane um 78%. Dieselfahrzeuge zeigen eine vergleichsweise geringe Emission an diesen Verbindungen (s. Abbildung 3-1 und Tabelle 3-2).

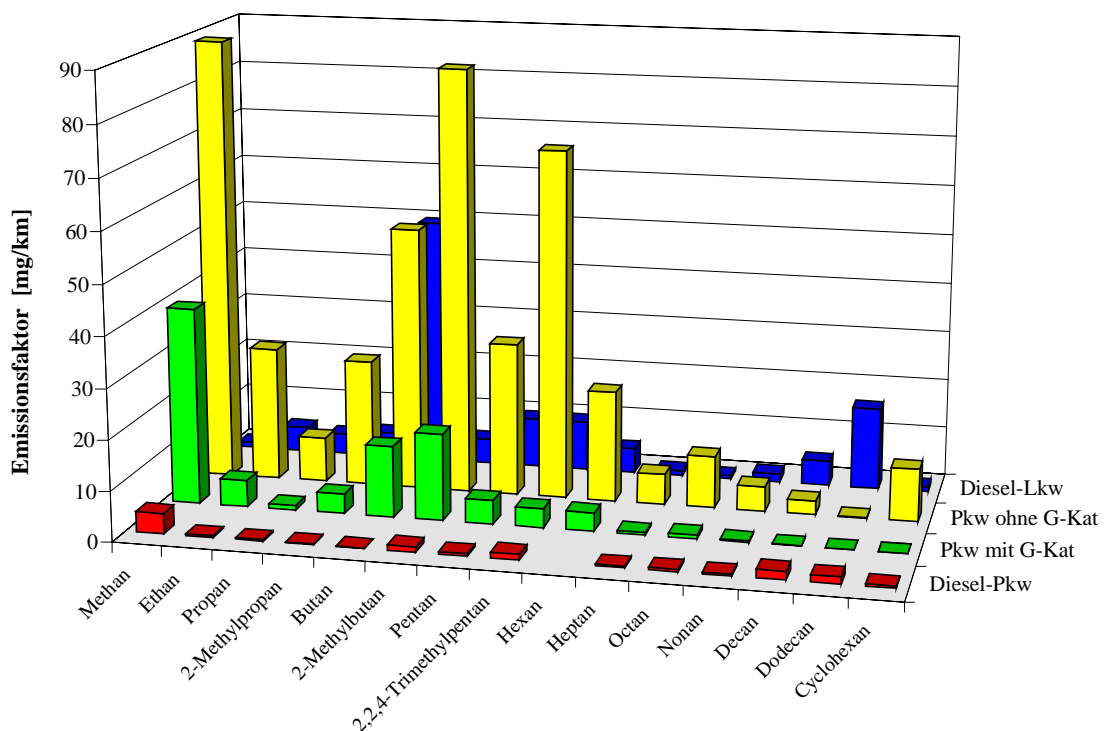


Abbildung 3-1: Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter gesättigter Kohlenwasserstoffe von Straßenkraftfahrzeugen [mg/km]

Bedeutendste Einzelkomponenten der Alkan-Emissionen sind Methan, das aus allen Kraftstoffkomponenten entsteht, und die jeweils wichtigsten Alkan-Komponenten des eingesetzten Kraftstoffs. Im katalytisch gereinigten Abgas kann der Paraffin-Anteil über 50%, der von Methan allein über 20% betragen [Rijkeboer & Hendriksen 1993]. Der Methan-Anteil an den Kaltstart-Emissionen konventioneller Otto-Pkw

kann über 10% liegen. Die Anteile einzelner Isomere in Kraftstoff, Roh- und gereinigtem Abgas sind in der Regel verschieden; dies wird durch unterschiedliche Reaktivität bei der Verbrennung wie durch die isomerisierungsfördernde Wirkung des Katalysators verursacht [IFEU 1995].

Die Tabelle 3-3 ist in alphabetischer Reihenfolge der Stammkohlenwasserstoffe angeordnet. Das führt dazu, dass die gleiche Kohlenstoffzahl an verschiedenen Stellen auftritt (Hexan, Methylpentan, Dimethylbutan).

Diese Anordnung der Verbindungen gilt auch für Tabelle 3-5 und weitere.

In die Luft emittierte Kohlenwasserstoffverbindungen führen in Kombination mit Stickoxiden zur Bildung von Ozon und anderen Photooxidantien. Methan bewirkt als klimarelevante Substanz einen negativen Umwelteffekt.

In bezug auf die Toxizität ist Hexan als neurotoxischer Stoff gesondert zu erwähnen.

Methan	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$
Ethan	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$

Tabelle 3-1: Strukturformeln von Methan und Ethan

Kohlenwasserstoffe gesamt					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat mg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat mg/km	Dieselmotor Pkw Mg/km	Dieselmotor Lkw mg/km	Literatur
HC, Kohlenwasserstoffe gesamt	214 ± 267	2.007 ± 1.630	167 ± 133	710 ± 348	Norem 1998, Ramamurthy et a. 1999, VW 1998, Rijkeboer 1993, den Otter 1993, Hoekmann 1992, Bailey 1990, Aqirp 1991, Andersson 1991, Alsberg 1989, Heeb et al. 1999, Duffy et al 1999, Coburn et al. 1998, BUWAL 1997, Staehelin et al. 1997, 1995, Westerholm et al. 1996, Sjögren et al. 1996
NMHC (Kohlenwasserstoffe ohne Methan)	500	1.000	50	1000	Pierson et al. 1996, Siegl et al. 1999, Zielinska et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

Tabelle 3-2: Emissionen an Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km)

Azyklische, gesättigte Kohlenwasserstoffe					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Alkane (gesamt)	214.000 \pm 141.000				Norem 1998
C3-C12 Alkane	41.400 \pm 6.110				Norem 1998
C4 Alkane	10.000				Norem 1998
C5 Alkane	50.000				Norem 1998
C6 Alkane	10.000				Norem 1998
C7 Alkane	10.000				Norem 1998
C8 Alkane	10.000				Norem 1998
C9 Alkane	5.000				Norem 1998
Butan	14.200 \pm 12.700	52.800 \pm 41.200	120 \pm 70	50.000	Norem 1998, Klingenberg 1996, Sagebiel et al. 1996, Zielinska et al. 1996
Butan	50.000 Max.				BUWAL 1995
2-Methylbutan (Iso-Pentan)	17.400 \pm 17.100	85.200 \pm 47.900	1.070 \pm 810	5.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, Klingenberg 1996, Staehelin et al. 1998, Zielinska et al. 1996
2-Methylbutan (Iso-Pentan)	50.000			50.000 Max.	Staehelin et al. 1998, Sagebiel et al. 1996, BUWAL 1995
Dimethylbutan	+			+	Staehelin et al. 1998
2,2-Dimethylbutan	5.000			10.000	Sagebiel et al. 1996, Zielinska et al. 1996
2,3-Dimethylbutan	1.000	10.000		1.000	Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, Zielinska et al. 1996
2,2,3-Trimethylbutan	100			1.000	Sagebiel et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

Tabelle 3-3: Emissionen an azyklischen, gesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1

Azyklische, gesättigte Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
Ethan	5.320 ± 4.160	26.800 ± 22.000	330 ± 260	5.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1998, Duffy et al. 1999, Klingenberg 1996, UM 1993, SRU 1994, Staehelin et al. 1998, Zielinska et al. 1996
Methan	39.300 ± 28.600	88.900 ± 42.200	4.010 ± 3.530	100.000	Norem 1998, Klingenberg 1996
Methan			13.100 Max.		Siegl et al. 1999
n-Decan	104 ± 98	2.810 ± 2.590	1.700 ± 1.190	5.000	Norem 1998, Duffy et al. 1999, Siegl et al. 1999
n-Decan	1.000 Max.			10.000 Max.	Staehelin et al. 1995, Staehelin et al. 1998, BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996
n-Docosan	10	100		500	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Dodecan	60 ± 50	100	1.420 ± 990	27.500	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1995, Siegl et al. 1999
n-Dodecan	500 Max.			50.000	BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996
n-Dotriacontan	1	5		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Eicosan	10	100		1.000	Rogge et al. 1993, Sagebiel et al. 1996
n-Heneicosan	7,75 ± 3,38	100		750 ± 250	SRU 1994, Sagebiel et al. 1996, Rogge et al. 1993
n-Hentriacontan	1	5		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Heptacosan	10	50		100	SRU 1994, Rogge et al. 1993
n-Heptadecan	100			10.000	Sagebiel et al. 1996
n-Heptan	2.000 ± 1.500	10.000 ± 4.230	340 ± 220	2.330 ± 1.770	Norem 1998, Staehelin et al. 1998, Staehelin et al. 1995, Sagebiel et al. 1996, Klingenberg 1996, Duffy et al. 1999, BUWAL 1995

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-3: Emissionen an azyklischen, gesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 2

Azyklische, gesättigte Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
2-Methylheptan	1.860 \pm 1.740		270 \pm 260	10.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996
2-Methylheptan	50.000 Max.				Stahelin et al. 1998
3-Methylheptan	1.600 \pm 1.510		470 \pm 400	1.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996
4-Methylheptan	500			500	Sagebiel et al. 1996
2,4-Dimethylheptan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
2,5-Dimethylheptan	500			1.000	Sagebiel et al. 1996
2,6-Dimethylheptan	500			500	Sagebiel et al. 1996
3,3-Dimethylheptan	175 \pm 162			500 \pm 249	Sagebiel et al. 1996
4,4-Dimethylheptan	100			100	Sagebiel et al. 1996
n-Hexacosan	10	50		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Hexadecan	50			10.000	Sagebiel et al. 1996
n-Hexan	3.670 \pm 3.350	22.200 \pm 10.900		5.000 \pm 1.500	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, Klingenberg 1996, Stahelin et al. 1998, Sagebiel et al. 1996, Stahelin et al. 1995, BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996
Methylhexan bzw. Dimethylpentan	1.000				Klingenberg 1996
2-Methylhexan	4.510 \pm 4.170		1.300 \pm 910	500	Norem 1998, Zielinska et al. 1996
2-Methylhexan	5.000 Max.			10.000 Max.	Stahelin et al. 1998
3-Methylhexan	3.670 \pm 3.090		630 \pm 630	6.670 \pm 2.220	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. #: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
 +: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-3: Emissionen an azyklischen, gesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 3

Azyklische, gesättigte Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
2,3-Dimethylhexan	1.000			500	Sagebiel et al. 1996
2,4-Dimethylhexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Sagebiel et al. 1996
2,5-Dimethylhexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Sagebiel et al. 1996
2,2,5-Trimethylhexan	500			500	Sagebiel et al. 1996
2,3,5-Trimethylhexan	1.000			1.000	Sagebiel et al. 1996
n-Isodecan	10	100		1.000	SRU 1994
n-Nonacosan	5	10		50	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Nonadecan	130 \pm 184	50		650 \pm 350	Sagebiel et al. 1996, SRU 1994, Rogge et al. 1993
n-Nonan	280 \pm 210	5.000	380 \pm 210	1.650 \pm 657	Norem 1998, Duffy et al. 1999, Staehelin et al. 1995, Sagebiel et al. 1996, BUWAL 1995
n-Nonan	500 Max.			1.000	Staehelin et al. 1998
n-Octacosan	1	10		50	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Octadecan	100			5.000	Sagebiel et al. 1996
n-Octan	750 \pm 720	10.400 \pm 7.210	490 \pm 460	625 \pm 375	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, Staehelin et al. 1998, BUWAL 1995
2,4-Dimethyloctan			500		Siegl et al. 1999
3,6-Dimethyloctan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Rogak et al. 1998
n-Pentacosan	10	100		500	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Pentadecan	25		100	50.000	Sagebiel et al. 1996, Siegl et al. 1999, Zielinska et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-3: Emissionen an azyklischen, gesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 4

Azyklische, gesättigte Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
2,6,10,14-Tetramethylpentadecan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
n-Pentan	4.760 \pm 4.200	30.700 \pm 17.400	500	10.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1998, Duffy et al. 1999, Klingenberg 1996, Zielinska et al. 1996
n-Pentan	10.000 Max.			10.000	Staehelin et al. 1995, BUWAL 1995
2-Methylpentan	7.500 \pm 2.500	50.000		5.000	Klingenberg 1996, Singer et al. 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1996, Zielinska et al. 1996
3-Methylpentan	10.000	50.000		5.000	Staehelin et al. 1995, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996
2,2-Dimethylpentan	500			500	Sagebiel et al. 1996
2,3-Dimethylpentan	5.330 \pm 3.110			5.330 \pm 3.110	Norem 1998, Staehelin et al. 1995, Sagebiel et al. 1996, BUWAL 1995
2,4-Dimethylpentan	1.000	5.000		750	Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999
2,2,4-Trimethylpentan (Iso-Octan)	3.830 \pm 3.500	69.900 \pm 46.700	1.180 \pm 490	10.000	Norem 1998, Klingenberg 1996, BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996
2,2,4-Trimethylpentan (Iso-Octan)	10.000 Max.			10.000	Staehelin et al. 1995
2,3,4-Trimethylpentan	5.000			1.000	Sagebiel et al. 1996, Zielinska et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen
Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-3: Emissionen an azyklischen, gesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 5

Azyklische, gesättigte Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
3-Ethylpentan	1.000			1.000	Sagebiel et al. 1996
2-Methylpropan (Isobutan)	3.930 \pm 3.510	25.400 \pm 24.100	210 \pm 150	5.000	Norem 1998, Duffy et al. 1999, Klingenberg 1996, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1998
2,2- Dimethylpropan	100			100	Norem 1998, Staehelin et al. 1998
n-Tetracosan	10	100		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Tetradecan	1		500	50.000	Sagebiel et al. 1996, Siegl et al. 1999, Zielinska et al. 1996
n-Triacontan	5	10		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Tricosan	10	50		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Tridecan	1		1.000	50.000	Sagebiel et al. 1996, Siegl et al. 1999, Zielinska et al. 1996
n-Undecan	340 \pm 340		1.880 \pm 1.250	5.330 \pm 3.110	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1995, Siegl et al. 1999
n-Undecan	1000 Max.			10.000 Max.	BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996
Propan	930 \pm 720	8.980 \pm 5.630	290 \pm 280	4.130 \pm 3.380	Norem 1998, Staehelin et al. 1998, Duffy et al. 1999, Klingenberg 1996, Sagebiel et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-3: Emissionen an azyklischen, gesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 6

In einer neuen Veröffentlichung von Touaty et al., der die Schadstoffe in einem Tunnelexperiment untersucht hatte, wurden zum Teil deutlich höhere Emissionsfaktoren gefunden. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle dargestellt. Die Messungen wurden zu verschiedenen Zeiten durchgeführt. Die Anzahl der Kraftfahrzeuge, deren Geschwindigkeit, die Luftgeschwindigkeit und die Zusammensetzung der Flotte (94% Pkw, 6% Lkw), war zu den verschiedenen Zeiten nahezu gleich [Touaty 2000]. Eine Deutungsmöglichkeit könnte sein, dass in Frankreich im Vergleich zu der Schweiz und den USA, wo auch verschiedene Tunnelexperimente durchgeführt wurden, der Anteil der Pkw mit Katalysator deutlich geringer ist.

Azyklische, gesättigte Kohlenwasserstoffe (Forts.)				
Messung	6 µg/km	1 µg/km	3 µg/km	Literatur
Kohlenmonoxid (CO)	8.100.000	7.840.000	9.970.000	Touaty et al. 2000
i-Butan	6.900	13.300	17.100	Touaty et al. 2000
n-Butan	22.400	30.300	25.100	Touaty et al. 2000
Ethan	6.100	7.000	12.400	Touaty et al. 2000
n-Hexan	1.400	1.500	4.200	Touaty et al. 2000
i-Pentan	57.100	64.200	113.400	Touaty et al. 2000
n-Pentan	8.300	11.200	3.400	Touaty et al. 2000
2-Methyl-Pentan	5.600	5.100	16.600	Touaty et al. 2000
3-Methylpentan	2.400	2.100	7.400	Touaty et al. 2000
Propan	1.300	4.500	2.600	Touaty et al. 2000

Messung 6 fand um 8:30 statt, Messung 1 um 2:30, Messung 3 um 5:30

Tabelle 3-3: Emissionen an azyklischen, gesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 7

3.2.2 Azyklische, ungesättigte Kohlenwasserstoffe

Von den vier untersuchten Fahrzeugklassen emittieren Pkw ohne Katalysator die größten Mengen an ungesättigten Kohlenwasserstoffen, gefolgt von den Diesel-Lkw, die deutlich darunter liegen. Die Emissionen von Diesel-Pkw sind hier vergleichbar mit denen von Autos mit Katalysator.

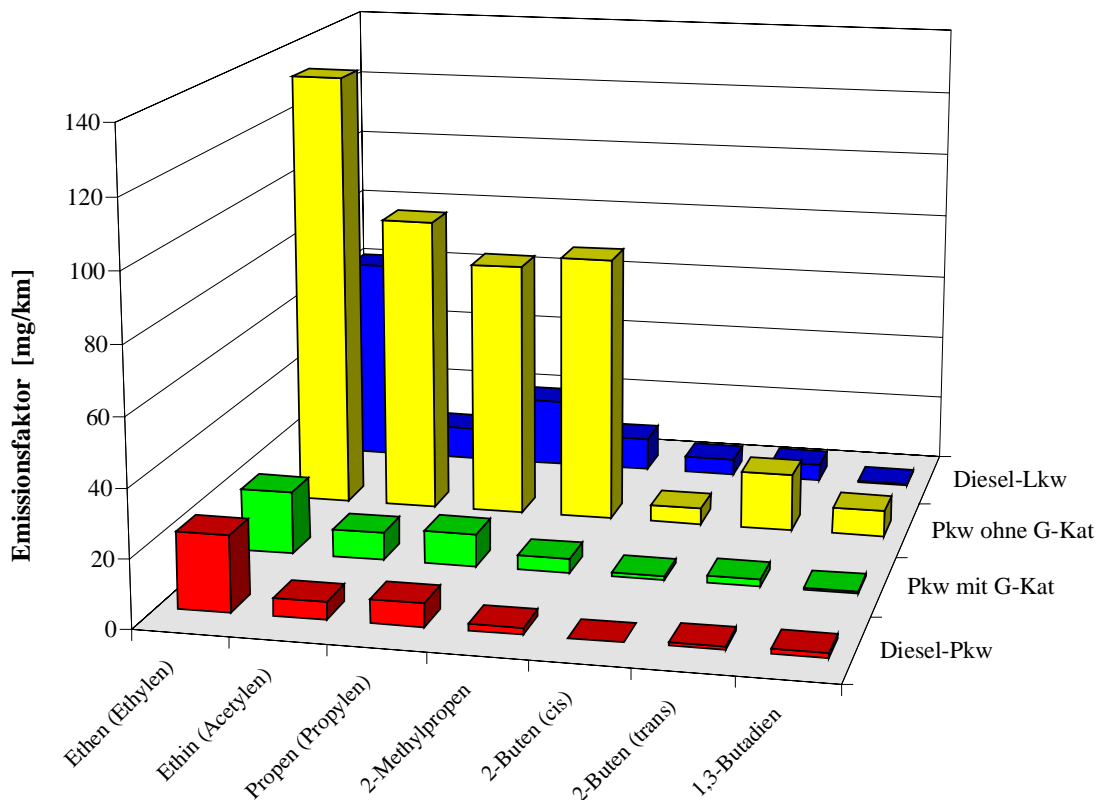


Abbildung 3-2: Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter ungesättigter Kohlenwasserstoffe von Straßenkraftfahrzeugen [mg/km]

Der Alken-Anteil an den HC-Emissionen hängt allgemein nur lose mit dem Alken-Gehalt des Kraftstoffs zusammen und ist im Rohabgas meist sehr viel höher als im Kraftstoff. Das gilt auch für katalytisch gereinigtes Abgas, obwohl die Alken-Emissionen relativ stärker als die gesamten HC-Emissionen reduziert werden. Die Alken-Fraktion der Kohlenwasserstoff-Emissionen besteht überwiegend aus leichten Olefinen, im wesentlichen Ethen (Ethylen); die häufig im Otto-Kraftstoff vorhandenen schwereren Alkene (Hexene, Heptene und Octene) gehören nicht zu den Kraftstoffbestandteilen, die die Zusammensetzung der HC-Emissionen direkt bestimmen [IFEU 1995].

Die leichteren Alkene - Ethen bis zu den Pentenen - besitzen erhebliche Ozon-Bildungspotentiale. 1,3-Butadien gilt als kanzerogen.

Weitgehend unabhängig von der Kraftstoffzusammensetzung bestehen die HC-Emissionen zu etwa 5 bis 10% aus Alkinen, vor allem Ethin (Acetylen). Alkine entstehen aus Alkanen, Alkenen und Aromaten.

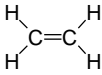




Ethen (Ethylen)	
Ethin (Acetylen)	$\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$
1,3-Butadien	
2-Methylbutan (Iso-Pentan)	
2,2,4-Trimethylpentan (Iso-Octan)	
Isopren	

Tabelle 3-4: Strukturformeln einiger ungesättigter Kohlenwasserstoffe

Azyklische, ungesättigte Kohlenwasserstoffe					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Alkene (gesamt)	61.100 \pm 39.000				Norem 1998
C4 Alkene	10.000				Norem 1998
C5 Alkene	5.000				Norem 1998
C6 Alkene	1.000				Norem 1998
1,3-Butadien	680 \pm 600	7.940 \pm 2.100	1.300 \pm 570	500	Norem 1998, Duffy et al. 1999, Klingenberg 1996, Sagebiel et al. 1998, Schuetzle et al. 1994
1,3-Butadien	3.600 Max.	18.700 Max.			Duffy et al. 1998
Buten (trans)	2.220 \pm 2.200	17.400 \pm 12.200	1.000	5.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, Staehelin et al. 1998
1-Buten	1.660 \pm 880	12.600 \pm 4.720		5.000	Norem 1998, Klingenberg 1996, Schuetzle et al. 1994, Sagebiel et al. 1996
2-Methyl-1-buten	500	6.010 \pm 1.600		5.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1998
3-Methyl-1-buten	500			1.000	Norem 1998, Klingenberg 1996, Staehelin et al. 1998, Sagebiel et al. 1996
2-Methyl-2-buten	1.400 \pm 1.200	5.610 \pm 2.440		3.120 \pm 1.690	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Klingenberg 1996, Staehelin et al. 1998
2-Buten (cis)	1.160 \pm 840	4.890 \pm 2.500	0,10	5.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, Staehelin et al. 1998
1-Butin	5.000	500 \pm 400			Norem 1998, Duffy et al. 1999
2-Butin	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Schuetzle et al. 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-5: Emissionen an azyklischen, ungesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1

Azyklische, ungesättigte Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$ + (#)	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$ + (#)	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$ + (#)	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$ + (#)	Literatur
1-Decen	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Rogak et al. 1998
Ethen (Ethylen)	18.600 \pm 15.100	132.000 \pm 44.200	22.300 \pm 9.700	62.600 \pm 25.200	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, Klingenberg 1996, UM 1993, Staehelin et al. 1998, Siegl et al. 1999, Zielinska et al. 1996
Ethin (Acetylen)	8.170 \pm 7.980	89.400 \pm 53.300	5.210 \pm 2.940	10.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, Klingenberg 1996, SRU 1994, Siegl et al. 1999, Zielinska et al. 1996
Ethin (Acetylen)	10.000 Max.				Staehelin et al. 1998
1-Hepten	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Rogak et al. 1998
2-Hepten (cis)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Rogak et al. 1998
3-Hepten (cis)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Rogak et al. 1998
3-Hepten (trans)	100			100	Sagebiel et al. 1996
1-Hexen	500			5.000	Sagebiel et al. 1996
2-Hexen (cis)	500			50	Sagebiel et al. 1996
2-Hexen (trans)	500			1.000	Sagebiel et al. 1996
3-Hexen (cis)	1.000			1.000	Sagebiel et al. 1996
4-Methylhexen	50			100	Sagebiel et al. 1996
Isopren	666 \pm 222	1.000		1.000	Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999
1-Nonen	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Rogak et al. 1998
1-Octen	1.000		1.000	1.000	Sagebiel et al. 1996, Siegl et al. 1999
Cis-2-Octen	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Rogak et al. 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. #: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
+ : im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-5: Emissionen an azyklischen, ungesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 2

Azyklische, ungesättigte Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
1-Penten	500	1.290 ± 800		5.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1998
2-Methyl-1-penten	500			1.000	Sagebiel et al. 1996
4-Methyl-1-penten	500			5.000	Sagebiel et al. 1996
2-Methyl-2-penten	500			500	Sagebiel et al. 1996
3-Methyl-2-penten	1.000			1.000	Sagebiel et al. 1996
4-Methyl-2-penten	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Rogak et al. 1998
2-Penten (cis)	440 ± 372	1.340 ± 1.030		1.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1998
2-Penten (trans)	403 ± 322	2.450 ± 1.550		5.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1998
2,4,4-Trimethyl-1-penten	1.000			500	Sagebiel et al. 1996
Propadien	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Schuetzle et al. 1994
Propen (Propylen)	9.690 ± 5.170	76.900 ± 3.000	6.860 ± 3.020	20.700 ± 16.700	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996 IARC 1989, Duffy et al. 1999, Klingenberg 1996, Siegl et al. 1999, Zielinska et al. 1996, Staehelin et al. 1998
2-Methylpropen (Isobuten)	4.230 ± 3.250	80.500 ± 50.600	1.960 ± 670	10.000	Norem 1998, Klingenberg 1996, Staehelin et al. 1998
Propin	400 ± 170	12.200 ± 4.020			Norem 1998, Duffy et al. 1999

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-5: Emissionen an azyklischen, ungesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 3

Auch bei den azyklischen, ungesättigten Kohlenwasserstoffen wurden von Touaty et al., der die Schadstoffe in einem Tunnelexperiment untersucht hatte, zum Teil deutlich höhere Emissionsfaktoren gefunden. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle dargestellt. Die Messungen wurden zu verschiedenen Zeiten durchgeführt. Die Anzahl der Kraftfahrzeuge, deren Geschwindigkeit, die Luftgeschwindigkeit und die Zusammensetzung der Flotte (94% Pkw, 6% Lkw), war zu den verschiedenen Zeiten nahezu gleich [Touaty 2000].

Azyklische, ungesättigte Kohlenwasserstoffe (Forts.)				
Messung	6 µg/km	1 µg/km	3 µg/km	Literatur
Kohlenmonoxid (CO)	8.100.000	7.840.000	9.970.000	Touaty et al. 2000
i-Buten	5.600	7.900	6.800	Touaty et al. 2000
1-Buten	6.100	5.300	6.000	Touaty et al. 2000
cis-2-Buten	2.100	3.200	8.300	Touaty et al. 2000
trans-2-Buten	2.400	3.400	2.800	Touaty et al. 2000
2-Methyl-1-buten	1.000	1.900	2.800	Touaty et al. 2000
2-Methyl-2-buten	1.600	2.100	2.300	Touaty et al. 2000
2-Butin	1.400	1.300	2.000	Touaty et al. 2000
Ethen	51.300	69.000	119.700	Touaty et al. 2000
Ethin	29.900	24.900	52.800	Touaty et al. 2000
1-Penten	500	1.800	3.400	Touaty et al. 2000
cis-2-Penten	800	1.000	1.100	Touaty et al. 2000
trans-2-Penten	1.600	2.000	2.100	Touaty et al. 2000
Propen	23.600	29.000	53.300	Touaty et al. 2000

Messung 6 fand um 8:30 statt, Messung 1 um 2:30, Messung 3 um 5:30

Tabelle 3-5: Emissionen an azyklischen, ungesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 4

3.2.3 Zyklische, gesättigte und ungesättigte Kohlenwasserstoffe

Der Ursprung für zyklische, nicht aromatische Kohlenwasserstoffe ist hauptsächlich unverbrannter Treibstoff. Vor allem die Verbindungen mit stereoideähnlicher Struktur sind typische Mineralölinhaltsstoffe.

Die Naphthene Cyclopentan und -hexan liegen in Roh- und im gereinigtem Abgas in halb so großen bis ähnlichen Anteilen vor wie im Kraftstoff. Cyclohepten und -octen sind bereits im Rohabgas weitgehend abgebaut [IFEU 1995].

Die Verbindungen tragen zur Bildung von Sommersmog bei.

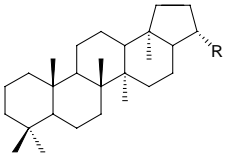
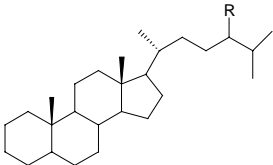
17 α (H),21 β (H)-Hopane	
5 α (H),14 α (H),17 α (H)-Sterane	

Tabelle 3-6: Strukturformeln einiger zyklischer Kohlenwasserstoffe

Zyklische, gesättigte und ungesättigte Kohlenwasserstoffe					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Cycloalkane	5.000				Norem 1998
Cyclohexan	10 \pm 10	10.600 \pm 7.570	420 \pm 290	1.000	Norem 1998, Duffy et al. 1999, Klingenberg 1996, Sagebiel et al. 1996
Decylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Dodecylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Ethylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998, Guicherit 1997
1-Ethyl-4-methylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Heptadecylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Hexadecylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Methylcyclohexan	220 \pm 180		360 \pm 280	1.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996
Nonylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Octadecylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Pentadecylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Tetradecylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Tridecylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Undecylcyclohexan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Cyclohexen	500			50	Sagebiel et al. 1996
Cyclopentan	705 \pm 210	6.760 \pm 1.720		2.170 \pm 1.890	Norem 1998, Duffy et al. 1999, Sagebiel et al. 1996, Klingenberg 1996
Cyclopentan	1.000 Max.				Sagebiel et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. #: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
 +: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-7: Emissionen an zyklischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1

Zyklische, gesättigte und ungesättigte Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
Methylcyclopentan	4.000 ± 1.500	10.000		2.330 ± 1.780	Staehelin et al. 1995, Sagebiel et al. 1996, Klingenberg 1996, Duffy et al. 1999, BUWAL 1995
Cyclopenten	666 ± 222	1.000		500	Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999
1-Methyl-cyclopenten	5000			500	Sagebiel et al. 1996, Zielinska et al. 1996
Pentacyclische Triterpene gesamt	10	10		100	SRU 1994
Stearane gesamt	10	10		100	SRU 1994
(22R)17α(H),21β(H)-30-Bishomohopan	1	5		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
(22S)17α(H),21β(H)-30-Bishomohopan	1	5		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
(20R)-5α(H),14α(H),17α(H)-Cholestan	5	10		50	Rogge et al. 1993, SRU 1994
(20S und R)-5α(H),14β(H),17β(H)-Cholestan	5	10		50	Rogge et al. 1993, SRU 1994
20S, 13β(H),17α(H)-Diacholestan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
(20S und R)-5α(H),14β(H),17β(H)-Ergostan	5	10		50	Rogge et al. 1993, SRU 1994
20R+S,5α(H),14β(H),17β(H)-Ergostan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
(22R)17α(H),21β(H)-30-Homohopan	1	5		50	Rogge et al. 1993, SRU 1994
(22S)17α(H),21β(H)-30-Homohopan	5	10		50	Rogge et al. 1993, SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-7: Emissionen an zyklischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 2

Zyklische, gesättigte und ungesättigte Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
17 α (H),21 β (H)-Hopan	10	10		100	SRU 1994, Rogge et al. 1993
17 α (H),21 β (H)-29-Norhopan	5	10		50	Rogge et al. 1993, SRU 1994
18 α (H)-29-Norneohopan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
8 β ,13 α -Dimethyl-14 β -[3'-methylbutyl]podocarpan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
8 β ,13 α -Dimethyl-14 β -n-butylpodocarpan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
(20S und R)-5 α (H),14 β (H),17 β (H)-Sitostan	1	10		100	SRU 1994
20R+S,5 α (H),14 β (H),17 β (H)-Sitostan	5	10		50	Rogge et al. 1993
22,29,30-Trisnorhopan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
22,29,30-Trisnorneohopan	5	5		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-7: Emissionen an zyklischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 3

3.2.4 Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (BTX-Aromaten)

Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, d.h. Benzol und seine Alkyl-Derivate, sind im Abgas von Ottomotoren sehr viel häufiger vertreten als im Diesel-Abgas. So haben Diesel-Pkw mit Abstand die geringsten Emissionen an Monoaromaten und sogar Diesel-Lkw weisen zum Teil niedrigere Werte auf als Benzin-Pkw mit G-Kat. Ohne katalytische Abgasreinigung sind die emittierten Mengen ca. eine Größenordnung höher (s. Abbildung 3-3).

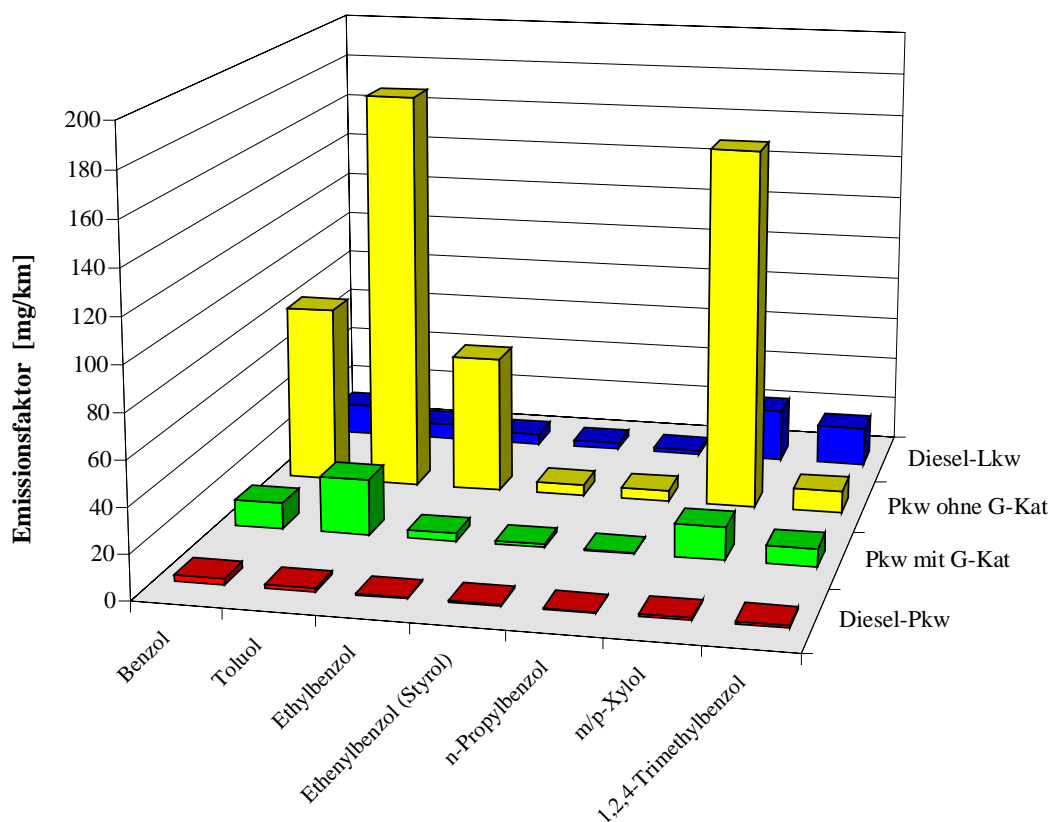


Abbildung 3-3: Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter monozyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe von Straßenkraftfahrzeugen [mg/km]

Benzol ist stets - auch bei Einsatz benzolfreier Testkraftstoffe - im Abgas nachweisbar. Es wird vor allem durch Dealkylierung substituierter Aromaten und in geringem Umfang durch Rekombination anderer Verbindungen gebildet; Oxidation und Fragmentierung des Benzols verlaufen dagegen aufgrund seiner thermodynamischen und kinetischen Stabilität deutlich langsamer und weniger vollständig als bei anderen Verbindungen. Auch der Einsatz von reinem Isooctan kann noch zu einem Benzol-Anteil von etwa 0,5% an den HC-Emissionen führen [IFEU 1995].

Aufgrund dieser Mechanismen ist bei Einsatz marktüblicher Kraftstoffe der Benzol-Anteil der HC-Emissionen mit dem Abgas stets größer als der Anteil im Kraftstoff; für Toluol und - tendenziell zunehmend ausgeprägter - für die Xylole und höher alkylierte Aromaten verhält es sich umgekehrt. Die Unterschiede beruhen darauf, dass Benzol aus allen Alkylaromaten, Toluol und die übrigen Alkylaromaten jedoch - in relevanten Mengen - nur aus den jeweils höher substituierten Alkylaromaten neu gebildet werden [IFEU 1995].

Die katalytische Abgasreinigung verstärkt diesen Effekt noch: Der Benzol-Anteil im gereinigten Abgas ist höher als im Rohabgas, während die Anteile der substituierten Aromaten geringer sind. Tendenziell steigt auch hier der Umsetzungsgrad mit dem Alkylierungsgrad; die schrittweise Dealkylierung findet an Katalysatoren parallel zur Oxidation aller organischen Verbindungen beschleunigt statt.

Weitere Ergebnisse der Studie "Komponenten-Differenzierung der Kohlenwasserstoffemissionen von KFZ" [IFEU 1995]:

- Die Benzol-Anteile an den HC-Emissionen konventioneller PKW sind - weitgehend unabhängig vom Betriebszustand - niedriger und die Alkylaromaten-Anteile höher als bei PKW mit G-Kat.
- Die HC-Kaltstart-Zuschläge konventioneller und mit G-Kat ausgestatteter 4-Takt-Otto-PKW weisen niedrigere Benzol- und höhere Alkylaromaten-Anteile auf als die Emissionen im Warmbetrieb; die Aufspaltung nimmt tendenziell mit der Geschwindigkeit zu. Besonders ausgeprägt ist der Unterschied der Benzol-Anteile am Kaltstart-Zuschlag und im Warmbetrieb bei PKW mit G-Kat
- Der Fett-Betrieb von Katalysator-Fahrzeugen mit Hochlastabschaltung der Lambda-Regelung führt zu einer deutlichen Erhöhung der absoluten Benzol-Emissionen; der Benzol-Anteil an den HC-Emissionen ändert sich relativ weniger, da bei Fett-Betrieb die HC-Minderungsrate extrem absinkt.

Benzol ist eindeutig humankanzerogen (MAK-Einstufung: III A1) und ist hauptverantwortlich für verkehrsbedingte Leukämiefälle bei Kindern. Das Auftreten von Krebs und Leukämie bei Kindern ist eindeutig mit der Belastung durch den Straßenverkehr korreliert [Teufel et. al 1998].

Die Umweltrelevanz der Alkylaromaten liegt in ihrem erheblichen Ozon-Bildungspotential. Chronische Vergiftungen mit Alkylaromaten können zu Schädigungen des Zentralnervensystems führen; kanzerogene und fruchtschädigende Wirkungen der Alkylaromaten werden diskutiert, sind aber nicht nachgewiesen.

Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Aromaten (gesamt)	132.000 \pm 101.000				Norem 1998
C8 Aromaten	50.000				Norem 1998
C9 Aromaten	10.000				Norem 1998
C10 Aromaten	5.000				Norem 1998
Benzol	11.900 \pm 9.510	81.000 \pm 47.500	2.910 \pm 2.110	13.900 \pm 10.700	Norem 1998, Duffy et al. 1999, Heeb et al. 1999, Klingenberg 1996, Staehelin et al. 1998, Siegl et al. 1999, BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996
Benzol	41.800 Max.	170.000 Max.	12.700 Max.		Hitzler bzw. Essers 1997, Duffy et al. 1998
Ethenylbenzol (Styrol)	1.570 \pm 1.540	5.000	640 \pm 630	3.000 \pm 2.000	Norem 1998, Duffy et al. 1999, Staehelin et al. 1998, Sagebiel et al. 1996
Ethenylbenzol (Styrol)	5.000 Max.				Zielinska et al. 1996
Ethylbenzol	3.540 \pm 3.260	62.200 \pm 48.400	550 \pm 500	4.830 \pm 1.790	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, Siegl et al. 1999, Staehelin et al. 1995, BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996
Ethylbenzol				10.000	Zielinska et al. 1996
1,2-Diethylbenzol			50		Siegl et al. 1999
1,4-Diethylbenzol			1.000		Siegl et al. 1999
Dimethylethylbenzol	1.000			5.000	Sagebiel et al. 1996
1,3-Dimethyl-2-ethylbenzol			100		Siegl et al. 1999

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. #: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
 +: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-8: Emissionen an monozyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1

Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
1-Methyl-2-n-propylbenzol			500		Siegl et al. 1999
1-Methyl-3-ethylbenzol			1.000		Siegl et al. 1999
1-Methyl-4-n-propylbenzol			100		Siegl et al. 1999
n-Pentylbenzol			500		Siegl et al. 1999
n-Propylbenzol	390 \pm 390	5.000	330 \pm 290	1.820 \pm 1.290	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999
n-Propylbenzol	1.000 Max.				Stachelin et al. 1998, BUWAL 1995
1,2,3,4-Tetramethylbenzol	1.000			5.000	Sagebiel et al. 1996
1,2,3,5-Tetramethylbenzol	1.000			10.000	Sagebiel et al. 1996, Zielinska et al. 1996
1,2,4,5-Tetramethylbenzol	1.000			5.000	Sagebiel et al. 1996
Trimethylbenzol (gesamt)	4.040 \pm 2.120				Norem 1998
1,2,3-Trimethylbenzol	1.720 \pm 1.290		530 \pm 400	2.320 \pm 1.100	Norem 1998, Stachelin et al. 1998, Sagebiel et al. 1996, Siegl et al. 1999, BUWAL 1995
1,2,3-Trimethylbenzol	5.000 Max.			5.000 Max.	Zielinska et al. 1996
1,2,4-Trimethylbenzol	8.040 \pm 7.270	10.000	1.140 \pm 1.110	17.600 \pm 16.200	Norem 1998, Duffy et al. 1999, Sagebiel et al. 1996, Stachelin et al. 1998, Siegl et al. 1999, BUWAL 1995

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.
+ : im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-8: Emissionen an monozyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 2

Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
1,2,4-Trimethylbenzol	10.000 Max.			50.000 Max.	Zielinska et al. 1996
1,3,5-Trimethylbenzol	2.130 \pm 1.810		610 \pm 550	4.250 \pm 3.250	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1998, BUWAL 1995
1,3,5-Trimethylbenzol				10.000 Max.	Zielinska et al. 1996
2,2,3-Trimethylbenzol	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Guicherit 1997
Isobutylbenzol	500			500	Sagebiel et al. 1996
Isopropylbenzol	400 \pm 390		10 \pm 9	680 \pm 320	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1998
Isopropylbenzol	1000 Max.				BUWAL 1995
sec-Butylbenzol	100			500	Sagebiel et al. 1996
Hexalbenzol	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Rogak et al. 1998
Indan	1.000			1.000	Sagebiel et al. 1996
1-Methylindan	1.000			10.000	Sagebiel et al. 1996, Zielinska et al. 1996
2-Methylindan	1.000			5.000	Sagebiel et al. 1996
4,7-Dimethylindan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
4-Methylindan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Toluol	25.300 \pm 24.100	182.000 \pm 102.000	1.550 \pm 1.400	6.910 \pm 6.830	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, IARC 1989, Duffy et al. 1999, Heeb et al. 1999, Klingenberg 1996, Staehelin et al. 1998, Siegl et al. 1999, BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996
Toluol	61.900 Max.				Duffy et al. 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. #: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
 +: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-8: Emissionen an monozyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 3

Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Ethyltoluol (gesamt)	2.610 \pm 2.010				Norem 1998
m/p-Ethyltoluol	10.000			10.000	Zielinska et al. 1996
m-Ethyltoluol	2.420 \pm 2.040		480 \pm 320	50.000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996
m-Ethyltoluol	5.000 Max.				BUWAL 1995
o-Ethyltoluol	2.000 \pm 2.000	10.000	500 \pm 400	10.000	Norem 1998, Staehelin et al. 1995, Sagebiel et al. 1996, Staehelin et al. 1998, Duffy et al. 1999, BUWAL 1995
o-Ethyltoluol	5.000				Zielinska et al. 1996
p-Ethyltoluol	3.670 \pm 1.780			3.000 \pm 2.000	Norem 1998, Staehelin et al. 1995, Sagebiel et al. 1996, BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996
Isopropyltoluol	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Rogak et al. 1998
Xylol (gesamt)	8.810 \pm 8.380	164.000		7.630 \pm 2.820	Norem 1998, Duffy et al. 1998
Xylol (gesamt)	46.500			Max.	Duffy et al. 1998
m/p-Xylol	14.900 \pm 14.600	164.000 \pm 109.000	1.090 \pm 1.000	23.800 \pm 18.600	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, Sagebiel et al. 1998, Staehelin et al. 1998, Siegl et al. 1999, BUWAL 1995
m/p-Xylol				50.000 Max.	Zielinska et al. 1996
o-Xylol	5.490 \pm 5.460	83.100 \pm 80.000		5.270 \pm 3.730	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Duffy et al. 1999, Staehelin et al. 1998, BUWAL 1995, Zielinska et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-8: Emissionen an monozyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 4

3.2.5 Biphenyl und alkylierte Biphenyle

Biphenyl, alkylierte Biphenyle					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Biphenyl	100			5.000	Sagebiel et al. 1996
2-Methylbiphenyl		+			IARC 1989
3-Methylbiphenyl		+			IARC 1989
Dimethylbiphenyl			+		IARC 1989
3,3'-Dimethylbiphenyl		+			IARC 1989
4,4'-Dimethylbiphenyl		+			IARC 1989
Trimethylbiphenyl			+		IARC 1989

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

Tabelle 3-9: Emissionen an Biphenyl und alkylierten Biphenylen von Straßenkraftfahrzeugen
(Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$)

3.2.6 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) werden von Kraftfahrzeugen in sehr viel geringeren Mengen als die bisher aufgeführten Kohlenwasserstoffe emittiert (unterer $\mu\text{g}/\text{km}$ -Bereich); sie sind aber aufgrund ihrer kanzerogenen Potenz für die Luftqualität von besonderer Bedeutung.

Auch ohne Berücksichtigung der an Rußpartikeln haftenden PAK, weisen Dieselfahrzeuge die höchsten Emissionen dieser Verbindungen auf (s. Abbildung 3-4 auf Seite 71). Die jeweils von Diesel-Pkw, Diesel-Lkw und Pkw ohne G-Kat insgesamt emittierten PAK-Mengen sind vergleichbar, die Emissionsprofile sind jedoch unterschiedlich. Pkw mit Katalysator stoßen etwa zehnmal weniger PAK als diese drei Fahrzeugkategorien aus (s. a. Tabelle 3-12 ab Seite 72).

Die PAK sind eine Stoffgruppe mit vielen humantoxikologisch bedenklichen Vertretern. Einige PAK sind karzinogen, andere können die Wirkung karzinogener Stoffe verstärken.

Ein mutagenes Potential wurde bislang bei den Vertretern dieser Stoffgruppe mit bis zu 3-Ringen (Naphthalin bis Fluoranthen) noch nicht nachgewiesen. PAK mit vier Ringen, hier insbesondere das Benzo[a]anthracen und seine alkyl-substituierten Homologe, zeigen eine starke kanzerogene Wirkung. Aus der Gruppe der 5-Ring-PAK besitzt das Benzo[a]pyren und in der Gruppe der 6- bis 7-Ring-PAK das Dibenzopyren die größte kanzerogene Wirkung.

Besonders relevant aufgrund ihrer weiten Verbreitung in der Umwelt und ihres Gefährdungspotentials sind mehrkernige Aromaten, die in der sogenannten U.S. EPA "priority pollutants"-Liste (vgl. Tabelle 3-10) zusammengefasst sind. Es handelt sich hierbei um insgesamt 16 Einzelverbindungen, die nach Vorkommen, Bedeutung, Umweltrelevanz und toxikologischen Gesichtspunkten als Leitsubstanzen angesehen werden können. Zahlreiche Vertreter aus der Gruppe der PAK wurden aufgrund ihrer toxikologischen Relevanz von verschiedenen Institutionen (z.B. WHO, EU, IARC, DFG, ACGIH) in eine entsprechende Gefährdungsklasse eingeteilt und, falls angezeigt, mit Grenz- bzw. Orientierungswerten (Tabelle 3-10).

Für eine Abschätzung des kanzerogenen Risikos durch PAK in der Außenluft wird pragmatischerweise davon ausgegangen, dass die Konzentration eines einzigen PAK als Maßstab für die kanzerogene Potenz der gesamten Gruppe verwendbar ist. Hierzu dient Benzo[a]pyren, weil über diesen Stoff die meisten Erfahrungen vorliegen. Diese Vorgehensweise ist jedoch nicht unproblematisch, da die Tumorraten nicht unbedingt mit dem Gehalt an Benzo[a]pyren korrelieren muss.

	IARC	MAK-Liste	EU	ACGIH	TA Luft (mg/m ³)	TrinkV
Naphthalin	3	III B	n.r.	n.r.	100/II ¹⁾	n.r.
Acenaphthalen	3	n.r.	n.r.	n.r.	¹⁾	n.r.
Acenaphthen	3	n.r.	n.r.	n.r.	¹⁾	n.r.
Fluoren	3	n.r.	n.r.	n.r.	¹⁾	n.r.
Phenanthren	3	n.r.	n.r.	n.r.	¹⁾	n.r.
Anthracen	3	n.r.	n.r.	n.r.	¹⁾	n.r.
Fluoranthen	3	n.r.	n.r.	n.r.	¹⁾	X
Pyren	3	n.r.	n.r.	n.r.	¹⁾	n.r.
Chrysen	3	III A2 ²⁾	n.r.	A2	¹⁾	n.r.
Benz[a]anthracen	2A	III A2 ²⁾	2	A2	¹⁾	n.r.
Benzo[b]fluoranthen	2B	III A2 ²⁾	2	A2	¹⁾	X
Benzo[k]fluoranthen	2B	III A2 ²⁾	2	n.r.	¹⁾	X
Benzo[a]pyren	2A	III A2 ²⁾	2	A2	0,1	X
Indeno[1,2,3-cd]pyren	2B	III A2 ²⁾	n.r.	n.r.	¹⁾	X
Dibenz[a,h]anthracen	2A	III A2 ²⁾	2	n.r.	0,1	n.r.
Benzo[ghi]perylen	3	n.r.	n.r.	n.r.	¹⁾	X

Tabelle 3-10: Einstufungen, Grenz- und Orientierungswerte für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, die in die U.S. EPA-Liste aufgenommen wurden.

IARC: International Agency for Research on Cancer der World Health Organisation

Gruppe 2A: Stoffe, die beim Menschen wahrscheinlich Krebs erzeugen

Gruppe 2B: Stoffe, die beim Menschen möglicherweise Krebs erzeugen

Gruppe 3: Stoffe, die hinsichtlich ihrer Krebserzeugung beim Menschen nicht klassifizierbar sind

MAK- und BAT-Werte Liste:

Gruppe III A2: Stoffe, die bislang nur im Tierversuch krebserzeugend sind

Gruppe III B: Stoffe mit begründetem Verdacht auf krebserzeugendes Potential

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (USA)

Gruppe A2: Stoffe, die beim Menschen möglicherweise krebserzeugend sind

¹ Organische Stoffe: TA Luft Abs. 3.1.7 und Anhang E: „Die in Anhang E nicht aufgeführten organischen Stoffe sind den Klassen zuzuordnen, deren Stoffen sie in ihrer Einwirkung auf die Umwelt am nächsten stehen. Dabei sind insbesondere Abbaubarkeit und Anreicherbarkeit, Toxizität, Auswirkungen von Abbauvorgängen mit ihren jeweiligen Folgeprodukten und Geruchsintensitäten zu berücksichtigen. Abschnitt 2.3 bleibt unberührt. Organische Stoffe mit begründetem Verdacht auf krebserzeugendes Potential sind der Klasse I zuzuordnen; auf Teil III B der MAK-Werte-Liste wird hingewiesen.“

² Unter den regelmäßig in Pyrolyseprodukten auftretenden PAK sind zahlreiche Vertreter im Tierversuch krebserzeugend. Ihr Anteil ist in Braunkohlenteeren, Steinkohlenteeren, Steinkohlenteerpechen, Steinkohlenteerölen, Kokereiohgasen besonders hoch. Für diese Aromatengemische ist die krebserzeugende Wirkung beim gewerblichen Umgang mit epidemiologischen Methoden nachgewiesen worden. Deshalb wurden sie in die Gruppe III A1 (Stoffe, die beim Menschen Krebs erzeugen) eingestuft. Wenn beim Umgang mit Pyrolyseprodukten wie Dieselmotor-Emissionen, Ottomotor-Emissionen, gebrauchten Motorenölen, Räucherrauch oder gebrauchten Schneidölen Expositionen gegenüber PAK nachgewiesen werden können, die sich im Tierversuch als krebserzeugend erwiesen haben, z.B. Benz[a]anthracen, Benzo[b]fluoranthen, Benzo[j]fluoranthen, Benzo[k]fluoranthen, Benzo[a]pyren, Chrysen, Dibenz[a,h]anthracen, Dibenz[a,e]pyren, Dibenz[a,h]pyren, Dibenz[a,i]pyren, Dibenz[a,l]pyren, Indeno[1,2,3-cd]pyren, sollten die Gemische wie Stoffe der Gruppe III A2 (Stoffe, die im Tierversuch krebserzeugend sind) gehandhabt werden.

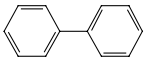
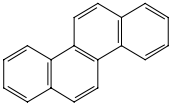

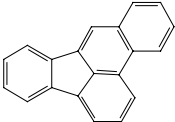
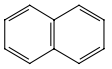
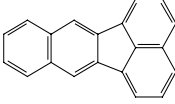
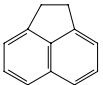
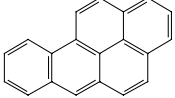
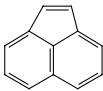
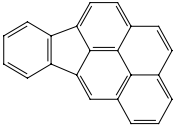
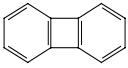
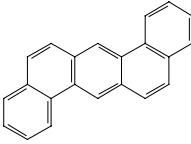
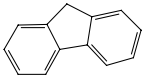
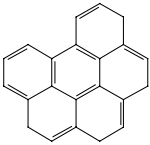
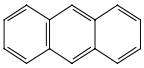
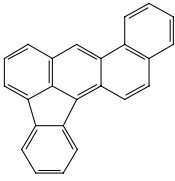
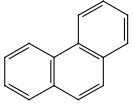
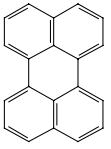
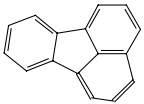
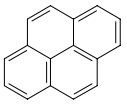
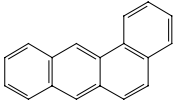
Biphenyl		Chrysen	
Inden		Benzo[b]-fluoranthen	
Naphthalin		Benzo[k]-fluoranthen	
Acenaphten		Benzo[a]pyren	
Acenaphtylen		Indeno[1,2,3-cd]-pyren	
Biphenylen		Dibenz[a,h]-anthracen	
Fluoren		Benzo[ghi]-perylen	
Anthracen		Indeno[1,2,3-cd]fluoranthen	
Phenanthren		Perylen	
Fluoranthen		Pyren	
Benz[a]-anthracen			

Tabelle 3-11: Strukturformeln einiger polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe

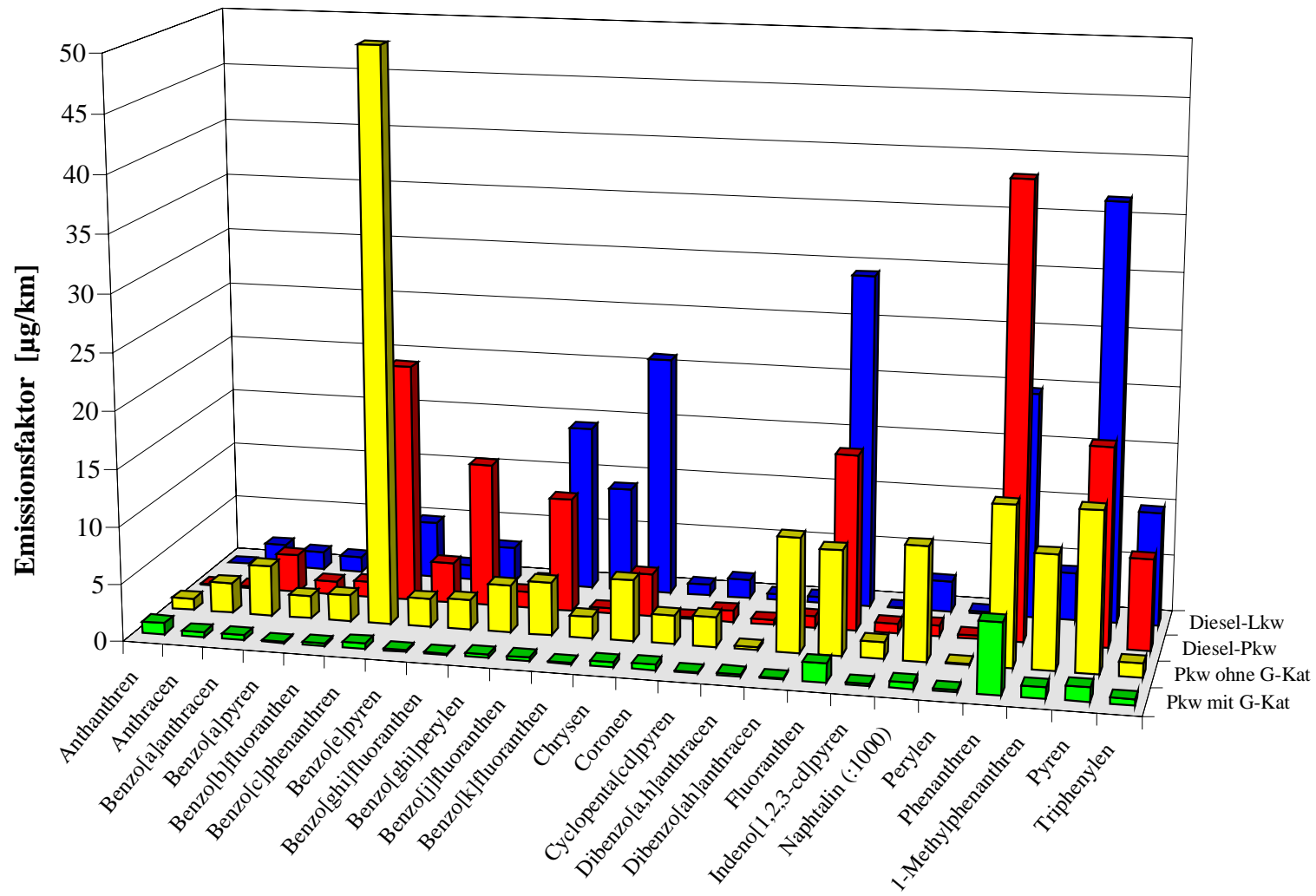


Abbildung 3-4: Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe von Straßenkraftfahrzeugen [µg/km]

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
PAK gesamt	10,1 \pm 8,09	105 \pm 90	106 \pm 96	159 \pm 126	Norem 1998, SRU 1994
Acenaphthalin	50			5.000	Sagebiel et al. 1996, Norem 1998, Claxton 1983
Acenapthen			100	50	Norem 1998, IARC 1989, Lowenthal et al. 1994, Siegl et al. 1999
Acephenanthrylen	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Anthanthren	0,06 \pm 0,05	0,13 \pm 0,13	0,11 \pm 0,08		Norem 1998, Rogge et al. 1993, Alsberg et al. 1985
Anthracen	0,46 \pm 0,46	2,65 \pm 2,53	1,19 \pm 0,97	2,01 \pm 1,88	Norem 1998, Claxton 1983, Rogge et al. 1998, Lowenthal et al. 1994
Anthracen	10 Max.	1.000 Max.	1.000 Max.	1.000 Max.	SRU 1994
Benzacenaphthylen	1	10		1	SRU 1994, Rogge et al. 1993
Benzo[a]anthracen	0,44 \pm 0,42	4,41 \pm 4,41	3,35 \pm 3,17	1,56 \pm 1,44	Norem 1998, Staehelin et al. 1998, Westerholm et al. 1996
Benzo[a]chrysen [Picen]				0,10	Sjögren et al. 1996
Benzo[b]chrysen	0,01	1			SRU 1994, Rogge et al. 1993
Benzo[a]fluoren			5	1,00 \pm 0,56	Norem 1998
Benzo[b]fluoren	0,49 \pm 0,48		9,12 \pm 8,10	5	Norem 1998
Benzo[a&b]fluoren	1	10		1	SRU 1994
Benzo[b&c]fluoren		+			IARC 1989
Benzo[a]fluoranthen			0,70		Norem 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. #: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
 +: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-12: Emissionen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
Benzo[b]fluoranthren	0,23 ± 0,23	2,31 ± 2,18	1,34 ± 1,09	8,94 ± 7,29	Norem 1998, Rogge et al. 1993, Staehelin et al. 1998, Lowenthal et al. 1998
Benzo[b&k]-fluoranthren	0,05			0,10	Westerholm et al. 1996, Sjögren et al. 1996
Benzo[b/k/j]-fluoranthren			5	5,00 µg/kWh	Norem 1998
Benzo[ghi]fluoranthren	0,13	2,63 ± 2,55	12,6 ± 11,5	3,15 ± 2,90	Norem 1998, Rogge et al. 1993, SRU 1994, Alsberg et al. 1985
Benzo[j]fluoranthren	0,32 ± 0,24	4,65 ± 4,22	10	14,5 ± 6,21	Norem 1998, IARC 1989, Rogge et al. 1998
Benzo[j]fluoranthren		10 Max.			SRU 1994, Alsberg et al. 1985
Benzo[k]fluoranthren	0,10 ± 0,10	1,89 ± 1,86	0,46 ± 0,45	9,19 ± 6,95	Norem 1998, IARC 1989, Rogge et al. 1998, Staehelin et al. 1998
Benzo[b]triphenylen	0,10	5			Rogge et al. 1998, SRU 1994
Benzo[c]phenanthren	0,50	50	21 ± 18	5	Norem 1998, Staehelin et al. 1998, SRU 1994
Benzo[a]pyren	0,11 ± 0,11	1,98 ± 1,96	1,15 ± 1,15	1,36 ± 1,03	Norem 1998, Rogge et al. 1993, Lowenthal et al. 1994
Benzo[a]pyren	0,55 Max.	5,5 Max.			SRU 1994, Alsberg et al. 1985
Benzo[e]pyren	0,17 ± 0,13	2,47 ± 2,26	3,57 ± 1,88	1,29 ± 1,26	Norem 1998, Staehelin et al. 1998
Benzo[e]pyren	0,55 Max.	50 Max.	10 Max.	6 Max.	SRU 1994, Alsberg et al. 1985, Rogge et al. 1998, Lowenthal et al. 1994
3,4,9,10-Dibenzopyren			+		Li et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. #: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
 +: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-12: Emissionen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in µg/km), Teil 2

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Benzo[ghi]cyclopenta- [pqr]perylene (1,12-Methylenbenzo- [ghi]perylene)		+			IARC 1989
Benzo[ghi]perylene	0,33 \pm 0,33	4,17 \pm 3,59	1,44 \pm 0,93	0,34 \pm 0,28	Norem 1998, IARC 1989, Rogge et al. 1998, Staehelin et al. 1998, Lowenthal et al. 1994
Benzo[ghi]perylene	0,55 Max.	55 Max.	10 Max.	1 Max.	SRU 1994, Alsberg et al. 1985
1,2-Binaphthyl			+		IARC 1989
2,2-Binaphthyl			+		IARC 1989
Biphenylen			+(#)	+(#)	Claxton 1983
Chrysen	0,42 \pm 0,35	5,36 \pm 5,29	3,77 \pm 2,41	21,1 \pm 10,9	Norem 1998, Staehelin et al. 1998, Lowenthal et al. 1994
Chrysen	0,55 Max.	10 Max.	10 Max.	10 Max.	SRU 1994, Alsberg et al. 1985
Coronen	0,50	2,50 \pm 2,06	0,2 \pm 0,2	1 \pm 0,7	Norem 1998, IARC 1989, Rogge et al. 1998
Coronen	1 Max.	55 Max.	1 Max.		SRU 1994, Alsberg et al. 1985
Cyclopenta[def]-phenanthren			+(#)	+(#)	Reilly et al. 1998
4H-Cyclopenta[def]- phenanthren			+		IARC 1989
10H-Cyclopenta[mno]- benzo[a]pyren (10,11- Methylenbenzol[a]-pyren		+			IARC 1989

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. #: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
+ : im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-12: Emissionen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 3

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
11H-Cyclopenta[qr]- benzo-[e]pyren (8,9-Methylen- benzo[e]pyren)		+			IARC 1989
Cyclopenta[cd]pyren (Cyclopenteno[cd]-pyren)	0,10	2,64 \pm 1,94	1,00	1,63 \pm 1,38	Norem 1998, IARC 1989, Rogge et al. 1998, Westerholm et al. 1996
Cyclopenta[cd]pyren	1 Max.	10 Max.			SRU 1994, Alsberg et al. 1985
Dibenzopyren bzw. - [def,p]chrysen	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	IARC 1989
Dibenzo[a,c]anthracen			5		Norem 1998
Dibenzo[a,h]anthracen	0,19 \pm 0,16	0,22 \pm 0,22	0,42 \pm 0,37	0,50	Norem 1998
Dibenzo[a,h]anthracen	0,50 Max.	10 Max.	5 Max.		Stahelin et al. 1998, Rogge et al. 1998
Dibenzo[a,j]anthracen	0,09 \pm 0,08	0,38 \pm 0,35	0,23 \pm 0,13		Norem 1998
Dibenzo[a,l]pyren	0,04 \pm 0,03	0,33 \pm 0,31	0,10		Norem 1998
Dibenzo[ac]anthracen bzw. Dibenzo[aj]anthracen			10		SRU 1994
Dibenzofuran		+	+ (#)	+ (#)	Claxton 1983, Simoneit 1998, IARC 1989
Fluoranthen	1,65 \pm 1,59	9,19 \pm 7,05	15,4 \pm 8,78	29,4 \pm 28,5	Norem 1998, IARC 1989, Rogge et al. 1998, Stahelin et al. 1998, Lowenthal et al. 1994
Fluoranthen		50 Max.	100 Max.	500 Max.	SRU 1994, Alsberg et al. 1985
Fluoren		10		50	Norem 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-12: Emissionen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 4

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Inden	500			5.000	Sagebiel et al. 1996
Indeno[1,2,3-cd]fluoranthren	1	50		0,05	Rogge et al. 1998, Sjögren et al. 1996, SRU 1994
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,16 \pm 0,11	1 \pm 1	0,85 \pm 0,81	0,08 \pm 0,07	Norem 1998, IARC 1989, Rogge et al. 1998, Staehelin et al. 1998
Indeno[1,2,3-cd]pyren		6 Max.	1 Max.		SRU 1994, Alsberg et al. 1985, Li et al. 1996
Naphthalin	560 \pm 560	10.000	960 \pm 670	5000	Norem 1998, Sagebiel et al. 1996, Lowenthal et al. 1998, Siegl et al. 1999
Naphthalin	5.000 Max.			10.000	Zielinska et al. 1996
Perylen	0,19 \pm 0,16	0,11 \pm 0,11	0,30 \pm 0,20	0,21 \pm 0,20	Norem 1998, IARC 1989, Rogge et al. 1998
Perylen		6 Max.		1 Max.	SRU 1994, Alsberg et al. 1985
Phenanthren	6,17 \pm 0,21	14,0 \pm 13,3	39,7 \pm 24,2	19,9 \pm 19,8	Norem 1998, IARC 1989, Sagebiel et al. 1996, Rogge et al. 1993
Pyren	1,27 \pm 1,12	14,0 \pm 13,4	17,4 \pm 10,4	36,8 \pm 36,6	Norem 1998, IARC 1989, Rogge et al. 1998, Staehelin et al. 1998, Lowenthal et al. 1994
Pyren		100 Max.	100 Max.	1.000	SRU 1994, Alsberg et al. 1985
Triphenylen	0,52 \pm 0,52	1,23 \pm 1,23	10 \pm 1	10	Norem 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-12: Emissionen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 5

3.2.7 Alkylierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Alkylierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
PAK's C1 substituiert (M:202)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C1 substituiert (M:226)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C1 substituiert (M:228)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C1 substituiert (M:252)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C2 substituiert (M: 178)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C2 substituiert (M: 202)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C2 substituiert (M:228)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C2 substituiert (M:252)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C3 substituiert (M: 178)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C3 substituiert (M: 202)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C3 substituiert (M:228)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C4 substituiert (M: 178)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
PAK's C4 substituiert (M: 202)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
<i>C1-Anthracene</i>					
Methylantracen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
1-Methylantracen		10		50	Norem 1998, Fraser et al. 1998
2-Methylantracen	0,50			3,65 ± 3,38	Norem 1998, Claxton 1983, Westerholm et al. 1996
9-Methylantracen			+ (#)	+ (#)	Li et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-13: Emissionen an alkylierten PAK von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 1

Alkylierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
<i>C2-Anthracene</i>					
Dimethylantracen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
9,10-Dimethylantracen			+ (#)	+ (#)	Li et al. 1996
<i>C3-Anthracene</i>					
Trimethylantracen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
<i>C4-Anthracene</i>					
Tetramethylantracen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
<i>Sonstige Anthracene</i>					
9-Phenylantracen			+ (#)	+ (#)	Li et al. 1996
Methylbenz[a]-anthracen			+		IARC 1989
Methylbenz[a]anthracene bzw. Methylchrysene bzw. Methyl- triphenylene	1	100		1	SRU 1994
<i>C1-Chrysene</i>					
3-Methylchrysen		+			IARC 1989
2- bzw. 5-Methylchrysen			+		IARC 1989
4- bzw. 6-Methylchrysen		+			IARC 1989

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-13: Emissionen an alkylierten PAK von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 2

Alkylierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
<i>C1-Fluoranthene</i>					
Methylfluoranthen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Methylfluoranthene bzw. Methylpyrene	1	100		10	SRU 1994
1-Methylfluoranthen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
2-Methylfluoranthen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
3-Methylfluoranthen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
7-Methylfluoranthen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
8-Methylfluoranthen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
<i>C2-Fluoranthene</i>					
Dimethylfluoranthene bzw. Dimethylpyrene	1	100		10	SRU 1994
<i>Sonstige Fluoranthene</i>					
Methylbenzfluoranthene bzw. Methylbenzpyrene bzw. Methylperylene	0,10	10			SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-13: Emissionen an alkylierten PAK von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 3

Alkylierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
<i>C1-Fluorene</i>					
Methylfluoren		+			IARC 1989
1-Methylfluoren				50 ±50	Norem 1998, Fraser et al. 1998
1-Methylfluoren		+			IARC 1989
2-Methylfluoren	0,50			0,01	Norem 1998, IARC 1989, Westerholm et al. 1996
9-Methylfluoren				10	Norem 1998
<i>C2-Fluorene</i>					
Dimethylfluorene		+			IARC 1989
Fluoren C2 substituiert	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
<i>C3-Fluorene</i>					
Fluoren C3 substituiert	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
<i>C1-Naphthaline</i>					
Methylnaphthalin					Simoneit 1998
1-Methylnaphthalin	1.000			10.000	Sagebiel et al. 1996, Zielinska et al. 1996
2-Methylnaphthalin	1.000			50.000	Sagebiel et al. 1996, Zielinska et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-13: Emissionen an alkylierten PAK von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 4

Alkylierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
<i>C2-Naphthaline</i>					
Naphthalin C2 substituiert	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
1,2-Dimethylnaphthalin		+			IARC 1989
1,3-Dimethylnaphthalin		+			IARC 1989
1,4-Dimethylnaphthalin		+			IARC 1989
1,5-Dimethylnaphthalin		+			IARC 1989
1,6-Dimethylnaphthalin		+			IARC 1989
1,7-Dimethylnaphthalin		+			IARC 1989
1,8-Dimethylnaphthalin		+			IARC 1989
2,3-Dimethylnaphthalin		+			IARC 1989
2,6-Dimethylnaphthalin		+			IARC 1989
2,7-Dimethylnaphthalin		+			IARC 1989
Ethyl-naphthalin	100			5.000	Sagebiel et al. 1996
1-Ethyl-naphthalin		+			IARC 1989
2-Ethyl-naphthalin		+			IARC 1989
<i>C3-Naphthaline</i>					
Naphthalin C3 substituiert	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
1,3,7-Trimethylnaphthalin		+			IARC 1989
1,6,7-Trimethylnaphthalin		+			IARC 1989
2,3,6-Trimethylnaphthalin		+			IARC 1989

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-13: Emissionen an alkylierten PAK von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 5

Alkylierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
<i>C4-Naphthaline</i>					
Naphthalin C4 substituiert	+	+	+	+	Fraser et al. 1998
Tetramethylnaphthalin			+		IARC 1989
<i>Sonstige Naphthaline</i>					
Dimethyltetrahydronaphthalin	1			5.000	Sagebiel et al. 1996
2-Benzyl-naphthalin	1	5			Rogge et al. 1993, SRU 1994
1-Phenyl-naphthalin		+			IARC 1989
2-Phenyl-naphthalin	0,50	10		5	Rogge et al. 1993, SRU 1994, Alsberg et al. 1985
<i>C1-Phenanthrene</i>					
Methylphenanthren			+	+	Claxton 1983, Simoneit 1998
Methylphenanthrene bzw. Methylanthracene	1	500		10	SRU 1994, Alsberg et al. 1985
1-Methylphenanthren	0,50	10		4,20 ± 3,51	Norem 1998, Claxton 1983
2-Methylphenanthren	0,10			15,4 ± 15,0	Norem 1998, Claxton 1983, Westerholm et al. 1996
3-Methylphenanthren				6,11 ± 5,46	Norem 1998, Claxton 1983
4 bzw. 9-Methylphenanthren				5	Sjögren et al. 1996
4-Methylphenanthren			+	+	Claxton 1983
9-Methylphenanthren				50	Norem 1998, Claxton 1983

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-13: Emissionen an alkylierten PAK von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 6

Alkylierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
<i>C2-Phenanthrene</i>					
Dimethylphenanthren				100	Lowenthal et al. 1994
Dimethylphenanthrene bzw. Dimethylantracene	1	50		10	SRU 1994, Alsberg et al. 1985
3,6-Dimethyl-Phenanthren	0,14 ± 0,12	0,95 ± 0,95	2,48 ± 1,52	50	Norem 1998
2- bzw. 9-Ethylphenanthren			+		IARC 1989
4,5-Methylenphenanthren		+			IARC 1989
<i>Sonstige Phenanthrene</i>					
Ethylmethylphenanthren bzw. – anthracen			+		IARC 1989
1-Methyl-7-isopropyl- phenanthren (Reten)	0,10			0,50	Sjögren et al. 1996, Westerholm et al. 1996, Khalili et al. 1995
Phenylphenanthren bzw. –anthracen			+		IARC 1989
1-Phenylphenanthren			+		IARC 1989
9-Phenylphenanthren			+		IARC 1989

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

Tabelle 3-13: Emissionen an alkylierten PAK von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 7

Alkylierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
<i>C1-Pyrene</i>					
Methylpyren		0,50		3.500 ± 3.000	Norem 1998
1-Methylpyren	0,01			1	Westerholm et al. 1996, Sjögren et al. 1996
2-Methylpyren				1	Sjögren et al. 1996
4-Methylpyren		+			IARC 1989
<i>Sonstige Pyrene</i>					
Methylbenzpyrene	0,10	10			SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

Tabelle 3-13: Emissionen an alkylierten PAK von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 8

3.2.8 Sonstige aromatische Kohlenwasserstoffe

Sonstige aromatische Kohlenwasserstoffe					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
3-Methyl-1,2-dihydrobenz[j]ace- anthrylene	0,02 \pm 0,02	0,05 \pm 0,05	0,06 \pm 0,04		Norem 1998
Methylacenaphthylen		+			IARC 1989
Benzacephenanthrylen	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
1,2-Diphenylethan			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
Diphenylen		+			IARC 1989
Diphenylmethan		+			IARC 1989
Methyldiphenylethan		+			IARC 1989
Methylperylene	0,10	10			SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-14: Emissionen an sonstigen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$)

3.3 Sauerstoffhaltige Verbindungen

3.3.1 Alkohole, Phenole und Ether

Azyklische und zyklische Hydroxyverbindungen (Alkohole)					
*	Ottomotor Pkw mit G- Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G- Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
Ethanol	5.000	1.000	10.000	34.000 ± 18.900	Norem 1998, Sjögren et al. 1996
2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	50	50		50	Rogge et al. 1993, SRU 1994
Methanol	+	5.000	1.000	50.400 ± 42.100	Norem 1998, Sjögren et al. 1996
Methyl-t-butyl-ether (MTBE)	50		500		Stahelin 1997
2-Propanol				10.000	Sjögren et al. 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

Tabelle 3-15: Emissionen an Alkoholen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km)

Aromatische Hydroxyverbindungen (Phenole)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
Dihydroxyanthracene					Alsberg et al. 1985
m/p-Kresol	30 ±10	500	500		Norem 1998
o-Kresol	10	500	10		Norem 1998
Phenol	500	5.000	1.000		Norem 1998
alkylierte Phenole (gesamt)	500	10.000	5.000		Norem 1998, SRU 1994
2,3-Dimethylphenol (2,3-Xylenol)		500	500		Norem 1998
2,4-Dimethylphenol (2,4-Xylenol)		500			Norem 1998
2,5-Dimethylphenol (2,5-Xylenol)		500			Norem 1998
2,6-Dimethylphenol (2,6-Xylenol)		500			Norem 1998
3,4-Dimethylphenol (3,4-Xylenol)		500			Norem 1998
3,5-Dimethylphenol (3,5-Xylenol)		500			Norem 1998
2-Ethylphenol		500			Norem 1998
3-Ethylphenol		500			Norem 1998
4-Ethylphenol		500	2.500		Norem 1998
2-Propylphenol	1.000		5.000		Norem 1998
2,3,5,6-Tetramethylphenol	5.000		500		Norem 1998
2,3,5-Trimethylphenol	5.000		100		Norem 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

Tabelle 3-16: Emissionen an Phenolen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km)

3.3.2 Azyklische Aldehyde und Ketone

Von den sauerstoffhaltigen, organischen Verbindungen sind die Aldehyde am stärksten in Automobilabgasen vertreten. Nicht aromatische Aldehyde werden besonders von Fahrzeugen mit Dieselmotor emittiert. Lastkraftwagen setzen knapp 400 mg an diesen Verbindungen pro Kilometer frei. Diesel-Pkw und Pkw ohne G-Kat sind mit rund 110 – 140 mg/km vergleichbar. Eine katalytische Abgasreinigung reduziert im Durchschnitt die Aldehyde um 92% (s. a. Tabelle 2-1 und Abbildung 2-2).

Als typische Produkte unvollständiger Verbrennung kommen die einfachsten Aldehyde Formaldehyd und Acetaldehyd am häufigsten im Abgas von Verbrennungsmotoren vor (Abbildung 3-5, Tabelle 3-18). Bei allen untersuchten Fahrzeugklassen stellt Formaldehyd die Hauptkomponente dar.

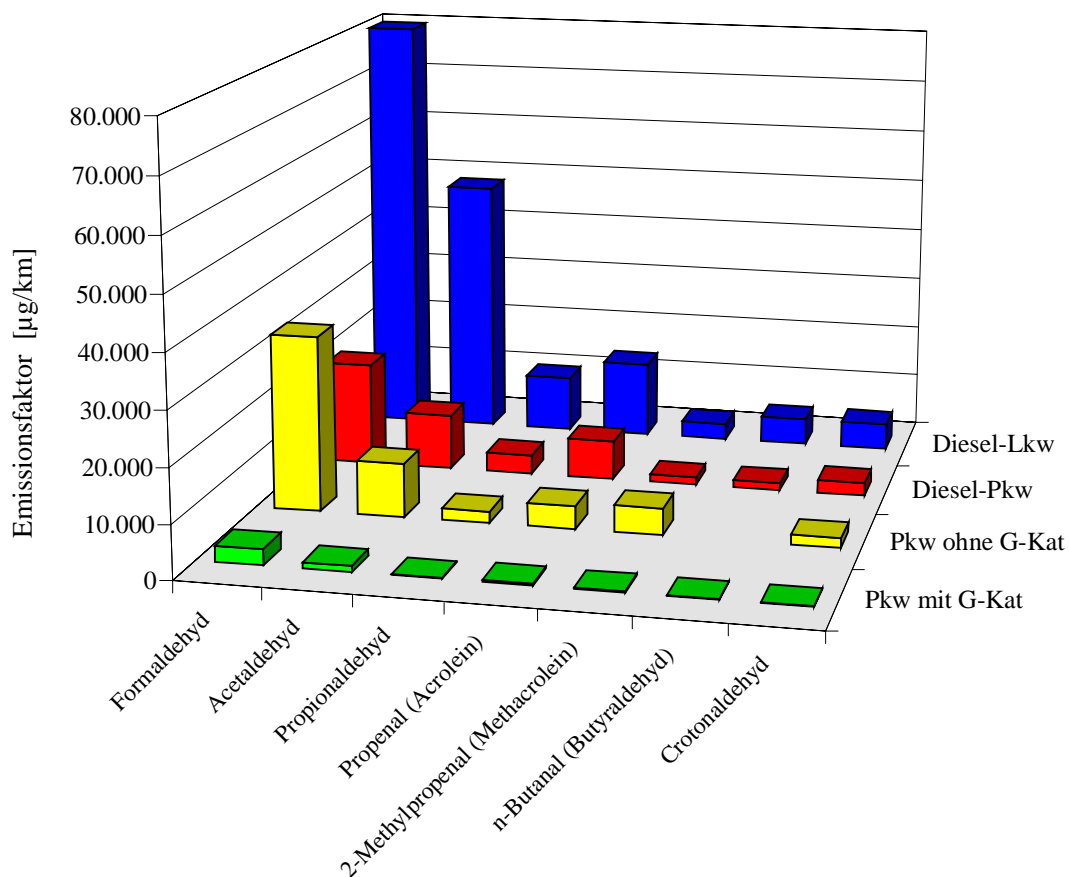


Abbildung 3-5: Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter azyklischer Aldehyde von Straßenkraftfahrzeugen [$\mu\text{g}/\text{km}$]

Aldehyde haben an den HC-Emissionen im Rohabgas von Otto-Motoren einen Anteil von etwa 5 %. Die Anteile höherer Aldehyde und Ketone streuen über einen sehr breiten Bereich. MTBE-Zusatz führt zu erhöhten Formaldehyd-Emissionen [IFEU 1995].

In einer Übersichtsarbeit werden die Erkenntnisse über Aldehydemissionen aus Verbrennungsmotoren wie folgt zusammengefasst [Wagner & Wyszynski 1996]:

- Aldehyde werden durch die unvollständige Oxidation von Kohlenwasserstoffen gebildet. Sie haben karzinogenes und Ozonbildungspotential.
- das am häufigsten auftretende Aldehyd in Abgasen von Verbrennungsmotoren ist Formaldehyd.
- in Verbrennungsmotoren, die mit Benzin oder Methanol oder einem Gemisch aus beiden betrieben werden und mager gefahren werden, steigen die Aldehydemissionen.
- Sauerstoffhaltige Additive in reformulierten Kraftstoffen sorgen im Trend für höhere Aldehydemissionen.
- Benzin- und Gas-betriebene Motoren mit katalytischer Abgasreinigung haben die niedrigsten Aldehydemissionen.
- Rotationskolbenmotoren erzeugen im allgemeinen hohe Aldehydemissionen.
- schlechte Verbrennungsbedingungen (Fehleinstellungen, alternde Katalysatoren) können die Aldehydemissionen erhöhen. Moderne Motoren tendieren zu niedrigeren Aldehydemissionen, vor allem, wenn Katalysatoren eingesetzt werden.
- von allen externen Reduktionssystemen zeigen 3-Wege-Katalysatoren das höchste Potential, Aldehyde zu reduzieren.

Unter den Aldehyden ist vor allem Formaldehyd als humantoxische und die Ozonbildung fördernde Verbindung von Bedeutung. Formaldehyd wirkt stark irritierend und kann Hautallergien hervorrufen. Eine Sensibilisierung der Luftwege ist möglich. Formaldehyd steht im Verdacht, beim Menschen Lungenkrebs zu erzeugen.

Acetaldehyd besitzt eine geringere akute Toxizität als das Formaldehyd. Ungesättigte Aldehyde wie das Propenal (Acrolein) und das Butenal (Crotonaldehyd) sind biologisch wesentlich aktiver als ihre gesättigten Analogen. Bei beiden Verbindungen handelt es sich um relativ reaktionsfähige Stoffe, die alkylierend wirken.

Aus der Stoffgruppe der azyklischen Aldehyde wurden von der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe die Stoffe Formaldehyd, Acetaldehyd und Butenal in die Gruppe III B (Stoffe mit begründetem Verdacht auf krebserzeugendes Potential) der MAK-Werte-Liste eingestuft.

Aldehyde stammen direkt aus Automobil- und Industrieabgasen. Andere lokal wichtige Quellen sind die Emissionen beim Verbrennen von Biomassen oder die direkte Emission aus Pflanzen. Aber auch die Photooxidation von sowohl anthropogenen als auch biogenen Kohlenwasserstoffen rührt zur Bildung von Aldehyden in der Atmosphäre, besonders im unteren Teil der Troposphäre über den Kontinenten. Deshalb sind Aldehyde sowohl primäre (direkt emittierte) als auch sekundäre (in der Atmosphäre gebildete) Luftinhaltsstoffe. Sie spielen eine wichtige Rolle in der troposphärischen Radikalchemie und tragen zur Bildung von Ozon im Sommer bei [Benning et al. 1997].

Formaldehyd	$\text{H}-\text{C} \begin{array}{l} \text{=} \text{O} \\ \text{H} \end{array}$
Acetaldehyd	$\text{H}_3\text{C}-\text{C} \begin{array}{l} \text{=} \text{O} \\ \text{H} \end{array}$
Crotonaldehyd	$\text{H}_3\text{C}-\text{CH}=\text{CH}-\text{C} \begin{array}{l} \text{=} \text{O} \\ \text{H} \end{array}$

Tabelle 3-17: Strukturformeln von Formaldehyd, Acetaldehyd und Crotonaldehyd

Azyklische Aldehyde					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Aldehyde (gesamt)	5.800 \pm 5.420	82.800 \pm 37.600	62.300 \pm 39.500	210.000	Norem 1998
Acetaldehyd	1.120 \pm 1.010	10.000 \pm 8.410	10.400 \pm 7.530	48.600 \pm 31.000	Norem 1998, Klingenberg 1996, Pierson et al. 1998, Staehelin et al. 1998, UM 1993, SRU 1994, Siegl et al. 1999, Zielinska et al. 1996
Crotonaldehyd	130 \pm 110	1.830 \pm 940	2.460 \pm 1.460	5.000	Norem 1998, SRU 1994, Westerholm et al. 1996, Siegl et al. 1999
Formaldehyd	2.940 \pm 2.570	32.800 \pm 15.800	19.400 \pm 16.300	81.700 \pm 51.300	Norem 1998, IARC 1989, Sagebiel et al. 1996, Klingenberg 1996, UM 1993, SRU 1994, Sjögren et al. 1996, Wagner & Wyszynski 1996, Westerholm et al. 1996, Staehelin et al. 1998, Siegl et al. 1999, Zielinska et al. 1996
Hexanal	50		450 \pm 300		Norem 1998
Hexanaldehyd	100		1.000		SRU 1994
Isobutyraldehyd	100	1.000	2.960 \pm 915		Norem 1998, SRU 1994
Isovaleraldehyd				500	Sjögren et al. 1996
Methylpropanal (Isobutanal)	50			4.500 \pm 900	Norem 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

Tabelle 3-18: Emissionen an azyklischen Aldehyden von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1

Azyklische Aldehyde (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
n-Butanal (Butyraldehyd)	150 \pm 100		1.500 \pm 850	5.000	Norem 1998, Sjögren et al. 1996, Siegl et al. 1999
3-Methylbutanal (i-Valeraldehyd)			330 \pm 260	340 \pm 240	Norem 1998
Nonanal	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
n-Pentanal (Valeraldehyd)	30 \pm 20		850 \pm 470		Norem 1998
Propanal	100			5.000	Stahelin et al. 1998
2-Oxopropanal (Methylglyoxal)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Propenal (Acrolein)	400 \pm 400	4.330 \pm 3.680	7.360 \pm 4.600	14.300 \pm 9.140	Norem 1998, Sjögren et al. 1996
Propenal (Acrolein)	1.000 Max.				SRU 1994
2-Methylpropenal (Methacrolein)	280 \pm 270	5.000	1.340 \pm 780	3.040 \pm 999	Norem 1998, Sjögren et al. 1996
Propionaldehyd	130 \pm 100	2.140 \pm 1.560	3.580 \pm 3.390	10.600 \pm 3.650	Norem 1998, Westerholm et al. 1996, SRU 1994, Siegl et al. 1999

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-18: Emissionen an azyklischen Aldehyden von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 2

Azyklische Ketone					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Aceton	630 \pm 480	2.930 \pm 2.640	4.680 \pm 3.470	13.700 \pm 4.420	Norem 1998, Siegl et al. 1999
Aceton	1.000 Max.				SRU 1994
Butanon	100			1.000	Stahelin et al. 1998
2-Butanon (Methylethylketon)	100 \pm 50	1.500	5.000	3.000 \pm 900	Norem 1998, Sjögren et al. 1996, SRU 1994
2-Butanon (Methylethylketon)	1.000 Max.			10.000 Max.	Pierson et al. 1998, Zielinska et al. 1996
3-Buten-2-on				5.000	Sjögren et al. 1996
1,2-Ethandion (Glyoxal)	100			1	Stahelin et al. 1998
Propanon	1.000			10.000	Stahelin et al. 1998
1,2-Propandion (Methylglyoxal)	100			1.000	Stahelin et al. 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen
Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-19: Emissionen an azyklischen Ketonen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$)

3.3.3 Aromatische Aldehyde

Aromatische Aldehyde werden von Diesel-Lkw und Pkw ohne G-Kat in etwa der gleichen Menge emittiert. Geringer sind die Mengen bei Diesel-Pkw (ca. ein Drittel) und bei Einsatz eines Katalysators (Reduktion um 94%) (s. Tabelle 2-1 Seite 33 und Abbildung 3-6 unten).

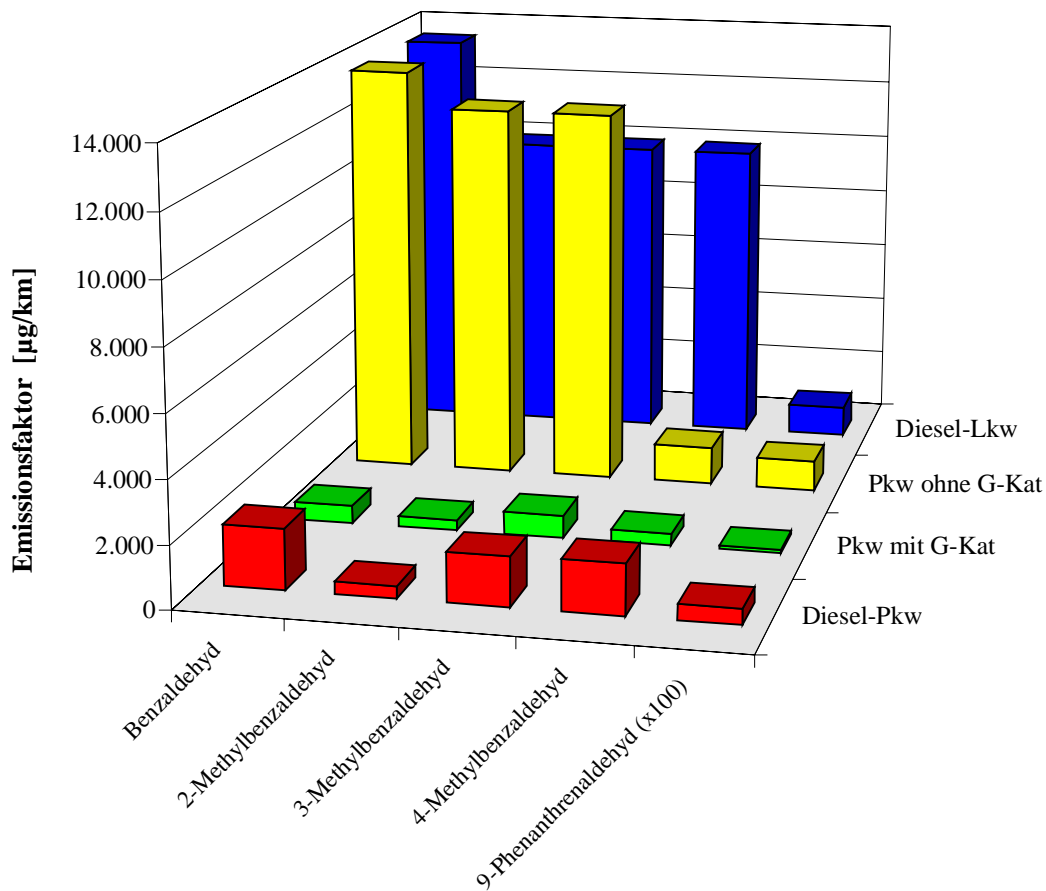


Abbildung 3-6: Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter aromatischer Aldehyde von Straßenkraftfahrzeugen [$\mu\text{g}/\text{km}$]

Die einfacher aufgebauten Vertreter Benz- und Tolyaldehyd dominieren das Spektrum der aromatischen Aldehyde.

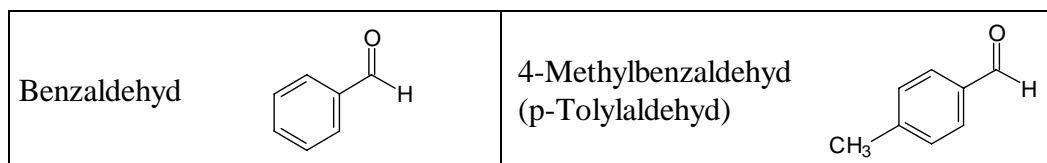


Tabelle 3-20: Strukturformeln von Benzaldehyd und p-Tolylaldehyd

Aromatische Aldehyde					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
<i>Benzaldehyde</i>					
Benzaldehyd	570 \pm 440	13.600 \pm 8.530	1.950 \pm 1.750	13.600 \pm 5.420	Norem 1998, Klingenberg 1996, SRU 1994, Siegl et al. 1999
Substituierte Benzaldehyde gesamt	10	100	10	10	SRU 1994
3-Methoxybenzaldehyd	1	5			Rogge et al. 1993, SRU 1994
3,4-Dimethoxybenzaldehyd	1	1			SRU 1994, Rogge et al. 1998
2-Methylbenzaldehyd (o-Tolylaldehyd)	340 \pm 260	12.400 \pm 9.640	400 \pm 290	10.000	Norem 1998, Rogge et al. 1993, SRU 1994
3-Methylbenzaldehyd (m-Tolylaldehyd)	730 \pm 690	12.400 \pm 9.640	1.580 \pm 1.410	10.000	Norem 1998, Rogge et al. 1993, SRU 1994
4-Methylbenzaldehyd (p-Tolylaldehyd)	380 \pm 220	12.400 \pm 9.640	1.620 \pm 1.530	10.000	Norem 1998, Rogge et al. 1993, SRU 1994
Dimethylbenzaldehyde gesamt	10	50		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
Trimethylbenzaldehyde gesamt	5	10			Rogge et al. 1993, SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

Tabelle 3-21: Emissionen an aromatischen Aldehyden von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1

Aromatische Aldehyde (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Anthracencarbox- aldehyd	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
9-Anthracenaldehyd			10		Norem 1998, SRU 1994
1,4-Benzoldicarbox- aldehyd	5	10		1	Rogge et al. 1993, SRU 1994
Dibenzofurancarbox- aldehyd	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
Fluoren-9- oncarboxaldehyd	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
1-Formylnaphthalin	5	10			Rogge et al. 1993, SRU 1994
2-Formylnaphthalin	10	100			Rogge et al. 1993, SRU 1994
9-Phenanthrenaldehyd	1	10	5	10	SRU 1994, Norem 1998
Salicylaldehyd	500		0	0	Norem 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-21: Emissionen an aromatischen Aldehyden von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 2

3.3.4 Aromatische Ketone

Ketone, die sich von PAK und alkylierten PAK ableiten, wurden in Motorabgasen zahlreich nachgewiesen; die quantitativen Angaben sind jedoch spärlich (s. Tabelle 3-23). Von der emittierten Menge her, sind Dieselfahrzeuge mit Pkw ohne Katalysator vergleichbar, das Substanzmuster unterscheidet sich jedoch deutlich (Abbildung 3-7). Die katalytische Nachreinigung reduziert die Emission der aromatischen Ketone um 90 %.

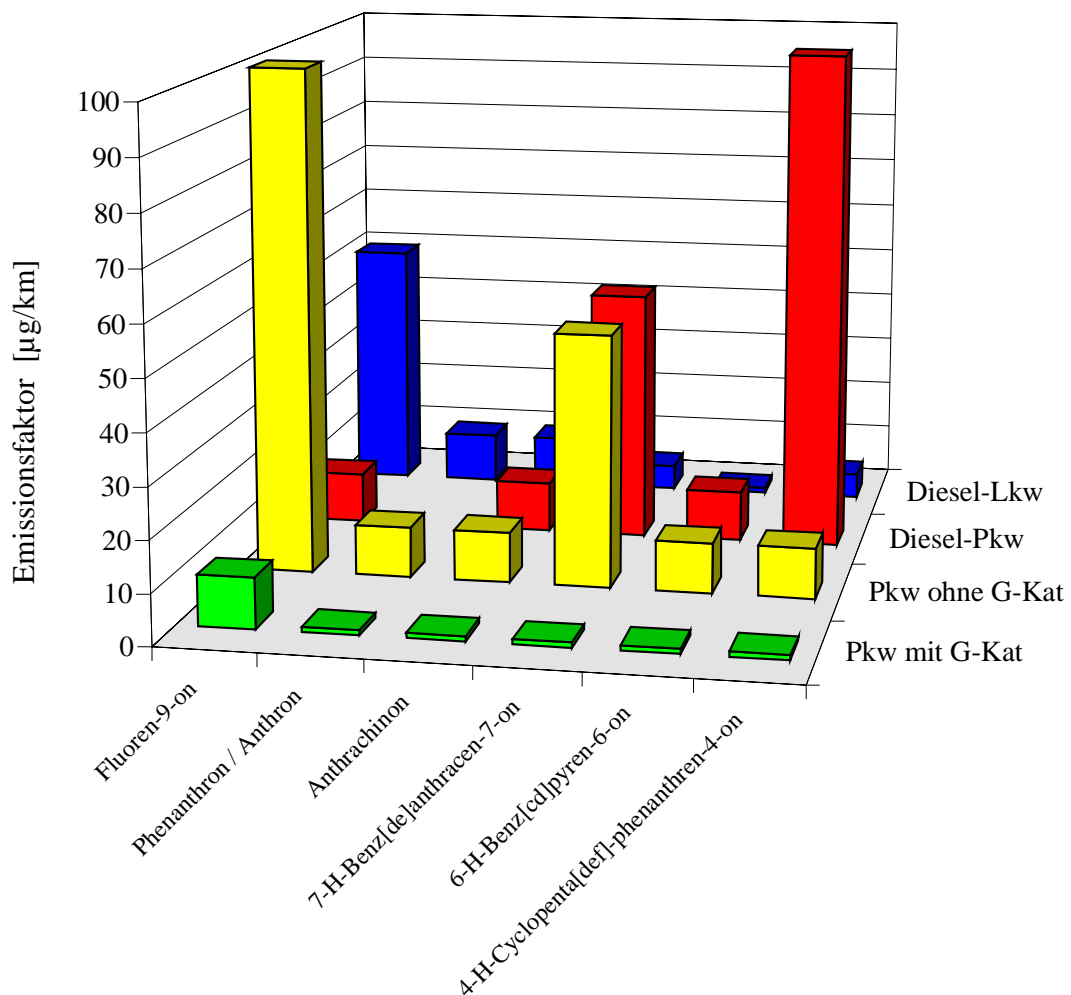


Abbildung 3-7: Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter aromatischer Aldehyde von Straßenkraftfahrzeugen [$\mu\text{g}/\text{km}$]

Benzochinon und Naphthochinon können toxikologisch die gleichen Reaktionen wie α,β -ungesättigte Ketone eingehen. Sie wirken alkylierend und besitzen eine hohe akute Giftigkeit. Anthrachinon, das wesentlich reaktionsträger ist, hat eine geringere akute Toxizität.

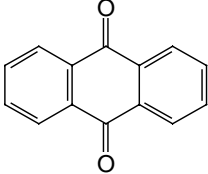
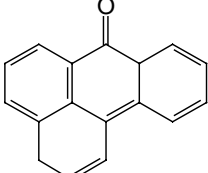
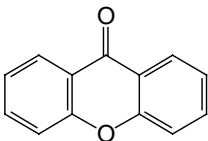
9,10-Anthrachinon	
Benzanthron	
Xanthon	

Tabelle 3-22: Strukturformeln einiger aromatischer Ketone

Aromatische Ketone					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
9,10-Anthrachinon	1	10	10	10	Norem 1998, Claxton 1983, SRU 1994
Methylantrachinon	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
Dimethylantrachinon	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
9(10H)-Anthracenon (Anthron)			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Methylanthron			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Dimethylanthron			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Trimethylanthron			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
1-H-Benz[de]anthracen-1-on	1	50		5	Rogge et al. 1993, SRU 1994
7-H-Benz[de]anthracen-7-on	1	50	50	5	SRU 1994, Rogge et al. 1998, Norem 1998
Benz[a]anthracen-7,12-dion			5		Norem 1998, SRU 1994
Benzanthron	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
Benzofluorenon	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Benzofluorenone (gesamt)			50		Norem 1998, SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. #: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
 +: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

Tabelle 3-23: Emissionen an aromatischen Ketonen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1

Aromatische Ketone (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Benzo[a]fluoren-9-on	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
Benzo[b]fluoren-9-on	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
Benzo[c]fluoren-9-on	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
Benzo[cd]pyren-6-on	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
6-H-Benzo[cd]pyren-6-on	1	10	10	1	Rogge et al. 1993, SRU 1994, Norem 1998
4-H-Cyclopenta[def]-phenanthren-4-on	1	10	100	5	SRU 1994, Alsberg et al. 1985, Norem 1998, Rogge et al. 1993
Cyclopentaphenanthren-5-on			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Dihydroinden-1-on			+	+	Claxton 1983
2,3-Dihydroxy-1H-indan-1-on	5	5		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
Dimethylbenzofuranon	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
Dimethylindendion	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
Fluoren-9-on	10	100	10	50	Rogge et al. 1993, SRU 1994, Norem 1998, Claxton 1983
C2-Alkylfluoren-9-on	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
C3-Alkylfluoren-9-on	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
2-Methylfluoren-9-on	1	10		10	SRU 1994, Rogge et al. 1998
Methylfluoren-9-on	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. #: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
 +: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

Tabelle 3-23: Emissionen an aromatischen Ketonen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 2

Aromatische Ketone (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
Fluorechinon			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
5-Methyl-1(3H)- isobenzofuranon	10	50			Rogge et al. 1993, SRU 1994
Methylbenzofuranon	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
Methylnaphthalin- carboxaldehyd	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985
Phenalen-1-on	+ (#)	+ (#)	10	+ (#)	Alsberg et al. 1985, SRU 1994
Phenalen-9-on	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
9,10-Phenanthrendion	5	10	+	50	Rogge et al. 1993, Claxton 1983
Phenanthron			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Phenanthron / Anthron	1,0	10		10	SRU 1994
9-H-Xanthen-9-on (Xanthon)	5	50	+ (#)	5	Rogge et al. 1993, SRU 1994, Alsberg et al. 1985, Claxton 1983

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.
+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden
Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

Tabelle 3-23: Emissionen an aromatischen Ketonen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 3

3.3.5 Carbonsäuren

Über die verkehrsbedingten Emissionen an Carbonsäuren liegen keine genauen quantitativen Angaben, sondern nur Größenordnungen vor [Rogge et al. 1993, SRU 1994]. Diese sind in Abbildung 3-8 und in Tabelle 3-24 wiedergegeben. Es fällt auf, dass Pkw mit katalytischer Abgasreinigung wesentlich mehr Carbonsäuren emittieren als solche ohne. In diesem Fall erhöht der Katalysator offensichtlich die Emissionen und zwar in Bezug auf alle Carbonsäuren um den Faktor 13. Diesel-Lkw stoßen noch etwas höhere Carbonsäuremengen aus. Die Emissionsfaktoren variieren je nach Einzelsubstanz sehr stark – die Spannweite reicht über 5 Zehnerpotenzen.

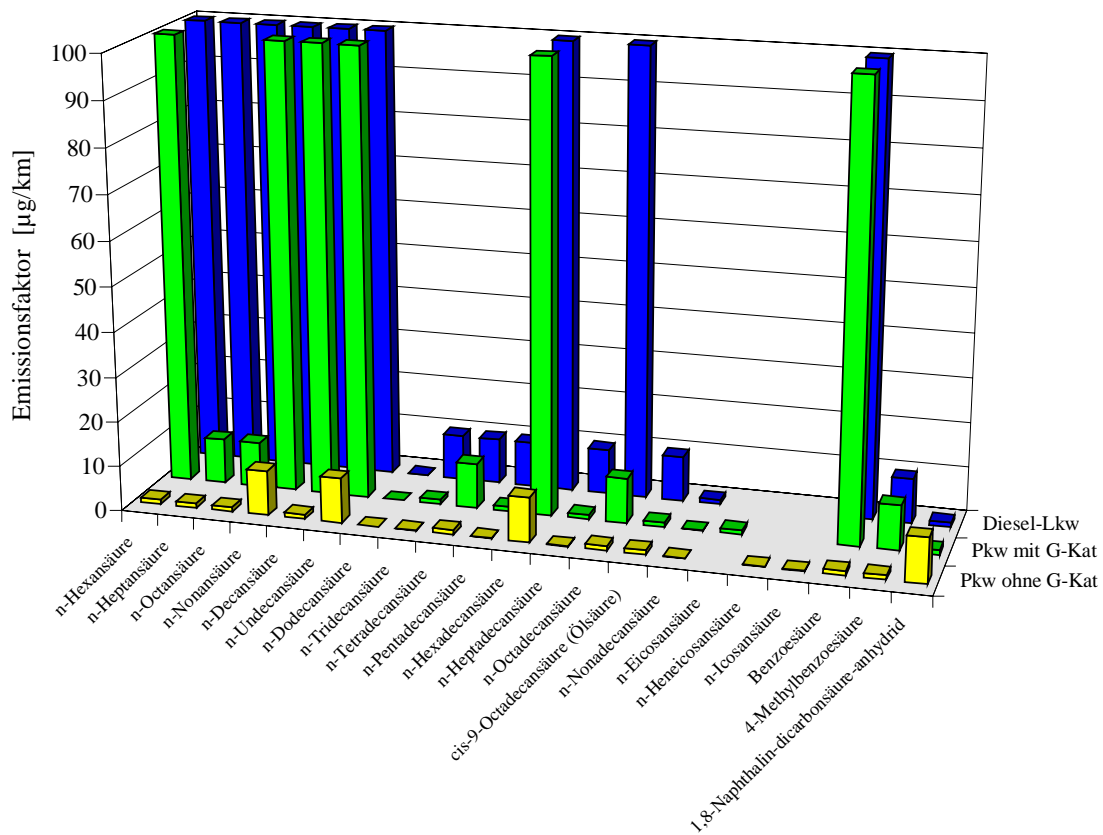


Abbildung 3-8: Emissionsfaktoren ausgewählter Carbonsäuren von Straßenkraftfahrzeugen (Größenordnungen, Einheit [$\mu\text{g}/\text{km}$])

Die Erklärung für die Erhöhung der Carbonsäureemissionen durch den Abgaskatalysator liegt in seiner Funktionsweise. Organische Verbindungen werden schrittweise bis hin zum Kohlendioxid oxidiert, wobei im allgemeinen die Abfolge *Kohlenwasserstoff – Alkohol/Phenol – Aldehyd/Keton – Carbonsäure – Kohlendioxid* durchlaufen wird. Sind die Bedingungen für die Katalyse nicht optimal, etwa durch zu niedrige Temperatur (Kaltstart!) oder eine teilweise inaktivierte Oberfläche durch Belag oder Alterungsprozesse, dann verläuft die Umsetzung nicht vollständig und bleibt vorzugsweise auf der Stufe der Carbonsäuren stehen. Dies spiegelt sich in den emittierten Mengen wider ¹.

¹ Ein vergleichbarer Effekt zeigt sich an den Verbindungen N₂O und NH₃ bei der katalytischen Reduktion (siehe Kapitel 3.8.1 auf Seite 136)

Azyklische Carbonsäuren					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
n-Alkansäuren gesamt	500	50		1.000	Rogge et al. 1993, SRU 1994
1,3-Propandicarbonsäure (Malonsäure)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
1,4-Butandicarbonsäure (Bernsteinsäure)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Methylbutansäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Methylbutensäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
n-Decansäure	100	1		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Dodecansäure	0,01	0,001		0,1	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Eicosansäure	1				Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Heneicosansäure		0,1			Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Heptadecansäure	1	0,1		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Heptansäure	10	1		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Hexadecansäure	100	10		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Hexansäure	100	1		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-24: Emissionen an Carbonsäuren von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1: azyklische Carbonsäuren

Azyklische Carbonsäuren (Forts.)					
	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
n-Icosansäure		0,1			Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Nonadecansäure	0,1	0,1		1	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Nonansäure	100	10		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Octadecansäure	10	1		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
cis-9-Octadecansäure (Ölsäure)	1	1		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Octansäure	10	1		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Pentadecansäure	1	0,1		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Pentansäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
n-Tetradecansäure	10	1		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Tridecansäure	1	0,1		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
n-Undecansäure	100	10		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
Palmitinsäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Stearinsäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-24: Emissionen an Carbonsäuren von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 2: azyklische Carbonsäuren (Forts.)

Aromatische Carbonsäuren					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Benzoessäure	100	1		100	Rogge et al. 1993, SRU 1994
2-Methylbenzoessäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
3-Methylbenzoessäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
4-Methylbenzoessäure	10	1	+ (#)	10	Rogge et al. 1993, SRU 1994, Fraser et al. 1998
2,4-Dimethylbenzoesäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
2,5-Dimethylbenzoesäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
2,6-Dimethylbenzoesäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
3,4-Dimethylbenzoesäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
3,5-Dimethylbenzoesäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
1,2,3-Benzoltricarboxylsäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
1,2,4-Benzoltricarboxylsäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
1,3,5-Benzoltricarboxylsäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
1,2,4,5-Benzoltetracarboxyl- säure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Dehydrabietinsäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
Naphthalinsäure	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
1,8-Naphthalin-dicarbonsäure- anhydrid	1	10	50	1	Rogge et al. 1993, SRU 1994, Norem 1998

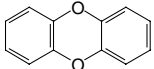
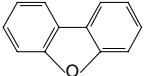

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-24: Emissionen an Carbonsäuren von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 3: aromatische Carbonsäuren

3.3.6 Sauerstoffhaltige Heterozyklen

Sauerstoffhaltige Heterozyklen					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Dibenzo-p-dioxin (DD) 				26.000	Norem 1998
Dibenzofuran (DF) 				2.800	Norem 1998
7-Methylbenzofuran 			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-25: Emissionen an sauerstoffhaltigen Heterozyklen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$)

3.4 Aliphatische Stickstoffverbindungen

3.4.1 Amine

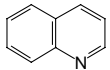
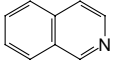
Amine					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat	Ottomotor Pkw ohne G-Kat	Dieselmotor Pkw	Dieselmotor Lkw	Literatur
Diethylamin	+				Norem 1998
n-Butylamin	+	+	+	+	Westerholm et al. 1993
Cadaverin	+	+	+	+	Westerholm et al. 1993
Decylamin	+	+	+	+	Westerholm et al. 1993
Dodecylamin	+	+	+	+	Westerholm et al. 1993
Ethylamin	+				Norem 1998
Hexylamin	+	+	+	+	Westerholm et al. 1993
Heptylamin	+	+	+	+	Westerholm et al. 1993
Methylamin	+				Norem 1998
n-Nonylamin	+	+	+	+	Westerholm et al. 1993
Octylamin	+	+	+	+	Westerholm et al. 1993
Pentylamin	+	+	+	+	Westerholm et al. 1993
Putrescine	+	+	+	+	Westerholm et al. 1993
Propylamin	+	+	+	+	Westerholm et al. 1993
Trimethylamin	+				Norem 1998

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-26: Emissionen an aliphatischen Aminen von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben)

3.4.2 Stickstoffhaltige Heterozyklen

Stickstoffhaltige Heterozyklen					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
9-Methylcarbazol (9-Methyldibenzopyrrol)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	IARC 1989
Chinolin 	0,5	5,0		0,5	Rogge et al. 1993, SRU 1994
Benzo[c]chinolin					Claxton 1983
Isochinolin 	5	5		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994
1-Methyl-2-pyrrolidon (m-Pyrol)	50	50		10	Rogge et al. 1993, SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-27: Emissionen an stickstoffhaltigen Heterozyklen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km)

3.4.3 Sonstige stickstoffhaltige Verbindungen

Sonstige stickstoffhaltige Verbindungen					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
N-haltige Verbindungen gesamt	10	100		10	SRU 1994
Cyanide (gesamt)	470 ± 210	2.950 ± 2270	1.000		Norem 1998
Blausäure (Cyanwasserstoff)	5.590			1.000	Norem 1998
N,N-Dibutylformamid	10	1		10	SRU 1994
Methylnitrit	50	100	100		Norem 1998
Ethylnitrit			100		Norem 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw.

Tabelle 3-28: Emissionen an sonstigen stickstoffhaltigen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen
(Emissionsfaktoren in µg/km)

3.5 Nitroverbindungen (Nitroarene)

Über diese Verbindungsklasse liegen so gut wie keine quantitativen Angaben vor, doch es ist offensichtlich, dass Nitroaromaten vor allem von Dieselfahrzeugen in großer Zahl emittiert werden (s. Tabelle 3-31).

Aromatische Nitroverbindungen sind von hoher toxikologischer Relevanz. Nitrobenzol wird im Organismus (Leber und Darm) zu N-Hydroxyanilin reduziert. Entsprechend lassen sich auch die Nitrogruppen anderer aromatischer Nitroverbindungen reduzieren. Mithin sind die aromatischen Nitroverbindungen weitgehend den (oft kanzerogenen) aromatischen Aminen gleichzusetzen. Bei ausreichender Beweiskraft für eine krebserzeugende Wirkung im Tierversuch in Abwesenheit verlässlicher Humandaten ist Nitrobenzol nach den Kriterien der U.S. EPA und der WHO als wahrscheinlich humankanzerogen bzw. als möglicherweise humankanzerogen einzustufen. 4-Nitrobiphenyl zeigt entsprechend dem 4-Aminobiphenyl ebenfalls eine krebserzeugende Wirkung.

Zahlreiche Nitro-PAK (auch "Nitroarene" genannt) zeigen im Testversuch eine direkte mutagene Wirkung. Einige davon (1,3-, 1,6-, 1,8-Dinitropyren, 3,7-, 3,9-Dinitrofluoranthren) gehören zu den stärksten Mutagenen, die man kennt. Vor allem das biologisch wirksamste 1,8-Dinitropyren wird deswegen häufig als "Supermutagen" bezeichnet. 1997 wurde 3-Nitrobenzanthron, eine Substanz mit vergleichbarer mutagener Wirkung, in Dieselabgasen und in Luftstaub gefunden [Enya et al. 1997]. Es wird nicht nur direkt durch den Verbrennungsprozess im Motor gebildet, sondern höchstwahrscheinlich auch durch die nachträgliche Reaktion von Benzanthron und Stickstoffoxiden in der Luft. Für die Gesamtmutagenität der untersuchten Rußpartikel ist zu einem erheblichen Anteil diese eine Verbindung verantwortlich. 3-Nitrobenzanthron wird als "wahrscheinlich humankarzinogen" angesehen.

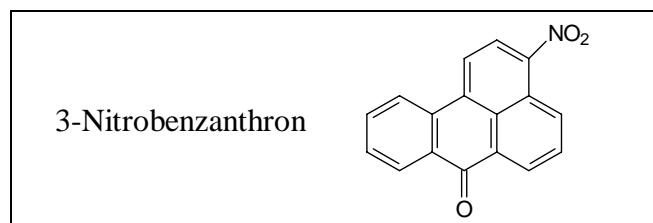


Tabelle 3-29: Strukturformel von 3-Nitrobenzanthron

Im Tierversuch zeigen sich Nitro-PAK eher schwach kanzerogen. Eine eindeutige Humankanzerogenität wurde bisher nicht nachgewiesen, wird jedoch für möglich

gehalten. Die von der IARC hinsichtlich ihrer Kanzerogenität bewerteten nitrierten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe sind in der folgenden Tabelle 3-30 zusammengefasst.

Substanz	IARC-Einstufung¹
<i>Diesel-Abgas gesamt</i>	2A
<i>Benzin-Abgas gesamt</i>	2B
3,7-Dinitrofluoranthren	3
3,9-Dinitrofluoranthren	3
1,3-Dinitropyren	3
1,6-Dinitropyren	2B
1,8-Dinitropyren	2B
7-Nitrobenzo[a]anthracen	3
6-Nitrobenzo[a]pyren	3
6-Nitrochrysen	2B
2-Nitrofluoren	2B
1-Nitronaphthalin	3
2-Nitronaphthalin	3
3-Nitroperylene	3
1-Nitropyren	2B
2-Nitropyren	3
4-Nitropyren	2B

Tabelle 3-30: Einstufung der Kanzerogenität einiger Nitro-PAK gemäß [IARC 1989]

¹ **IARC: International Agency for Research on Cancer der World Health Organisation**

- 1: Stoffe, die beim Menschen Krebs erzeugen
- 2A: Stoffe, die beim Menschen wahrscheinlich Krebs erzeugen
- 2B: Stoffe, die beim Menschen möglicherweise Krebs erzeugen
- 3: Stoffe, die hinsichtlich ihrer Krebsproduktion beim Menschen nicht klassifizierbar sind
- 4: Stoffe, die wahrscheinlich beim Menschen nicht krebserzeugend sind

3.5.1 Aromatische Nitroverbindungen

Aromatische Nitroverbindungen					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
<i>Nitroacenaphthylene</i>					
Nitroacenaphthylen			+		Sellström et al. 1987, Claxton 1983
Alkyl-[C1-3]- Nitroacenaphthylene			+	(#)	Sellström et al. 1987
Methylnitroacenaphthylen			+	(#)	Claxton 1983
<i>Nitroanthracene</i>					
Nitroanthracen			+	(#)	Claxton 1983, Sellström et al. 1987
Nitroanthracen / -phenanthren [2 Isomere]			+	(#)	IARC 1989
2-Nitroanthracen			+	(#)	Claxton 1983
2-Nitroanthracen / -phenanthren			+	(#)	IARC 1989
9-Nitroanthracen			1	2 $\mu\text{g}/\text{kWh}$	Norem 1998, Claxton 1983, SRU 1994
Methylnitroanthracen			+	(#)	Sellström et al. 1987, Claxton 1983

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-31: Emissionen an aromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren wie angeg.), Teil 1

Aromatische Nitroverbindungen (Forts.)					
	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
<i>Nitroanthracene (Forts.)</i>					
Methylnitroanthracen / -phenanthren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
1-Methyl-9-nitroanthracen				+	IARC 1989
1-Methyl-10-nitroanthracen / -phenanthren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
9-Methyl-10-nitroanthracen / -phenanthren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
Dimethylnitroanthracen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Dimethylnitroanthracen / -phenanthren [5 Isomere]			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
Trimethyl-nitroanthracen / -phenanthren [6 Isomere]			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
Nitrobenzol	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Fraser et al. 1998
<i>Nitrobiphenyle</i>					
Nitrobiphenyl			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983, Sellström et al. 1987
2-Nitrobiphenyl			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983, IARC 1989
3-Nitrobiphenyl			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983, IARC 1989
4-Nitrobiphenyl			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983, IARC 1989
Alkyl-[C1-3]-Nitrobiphenyle			+ (#)	(#)	Sellström et al. 1987

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-31: Emissionen an aromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben), Teil 2

Aromatische Nitroverbindungen (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
<i>Nitrobiphenyle (Forts.)</i>					
Methylnitrobiphenyl			+	+	Claxton 1983
2-Methyl-4-Nitrobiphenyl			+	+	Claxton 1983
3-Methyl-4-Nitrobiphenyl			+	+	Claxton 1983
Methyldinitrobiphenyl			+	+	Claxton 1983
<i>Nitrochrysen</i>					
1-Nitrochrysen			+	+	IARC 1989
Methylnitrochrysen			+	+	Claxton 1983
<i>Nitrofluoranthene</i>					
Nitrofluoranthen			+	(#)	Sellström et al. 1987
1-Nitrofluoranthen			+	+	IARC 1989
3-Nitrofluoranthen			0,1		Norem 1998, SRU 1994
7-Nitrofluoranthen			+	+	IARC 1989
8-Nitrofluoranthen			+	+	IARC 1989
Alkyl-[C1-2]-Nitrofluoranthen			+	(#)	Sellström et al. 1987
Methylnitrofluoranthen			+	+	Claxton 1983

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-31: Emissionen an aromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 3

Aromatische Nitroverbindungen (Forts.)					
	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
<i>Nitronaphthaline</i>					
1-Nitronaphthalin			+ (#)	+ (#)	IARC 1989, Sellström et al. 1987
2-Nitronaphthalin			+ (#)	+ (#)	IARC 1989, Sellström et al. 1987
Alkyl-[C1-5]-Nitronaphthalin			+		Sellström et al. 1987
Methylnitronaphthalin			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Methyl-1-nitronaphthalin			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
1-Methyl-2-nitronaphthalin			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
2-Methyl-1-nitronaphthalin			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983, IARC 1989
3-Methyl-2-nitronaphthalin			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Trimethylnitronaphthalin [3 Isomere]			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
Dinitronaphthalin			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
Methyldinitronaphthalin			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
<i>Nitroperylene</i>					
Nitroperylen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
3-Nitroperylen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
<i>Nitrophenanthrene</i>					
Nitrophenanthren			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983, Sellström et al. 1987
2-Nitrophenanthren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
Methylnitrophenanthren			+ (#)	(#)	Sellström et al. 1987

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

Tabelle 3-31: Emissionen an aromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben), Teil 4

Aromatische Nitroverbindungen (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
<i>Nitrofluorene</i>					
2-Nitrofluoren			1	1	Norem 1998, Claxton 1983, SRU 1994
Dinitrofluoren			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
2,5-Dinitrofluoren			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983, IARC 1989
2,7-Dinitro-9-fluoren			0,1		SRU 1994
2,7-Dinitrofluoren			0,1		Norem 1998
Methylnitrofluoren			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Nitroinden			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
<i>Nitropyrene</i>					
1-Nitropyren	0,05	0,5	5	1 ± 1	Norem 1998, Sjögren et al. 1996, Westerholm et al. 1996, SRU 1994
2-Nitropyren	0,0005	0,01			Norem 1998
Alkyl-[C1-2]-Nitropyren			+		Sellström et al. 1987
Methylnitropyren			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
1-Methyl-3-nitropyren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
1-Methyl-6-nitropyren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
1-Methyl-8-nitropyren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-31: Emissionen an aromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 5

Aromatische Nitroverbindungen (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
<i>Nitropyrene (Forts.)</i>					
Nitrobenzo[a]pyren			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Nitrobenzo[e]pyren			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
1-Nitrobenzo[a]pyren			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
3-Nitrobenzo[a]pyren			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
6-Nitrobenzo[a]pyren			0,1		SRU 1994, Norem 1998
Dinitropyrene gesamt [1,3-; 1,6-; 1,8-]			0,1	2	Norem 1998, SRU 1994
1,3-Dinitropyren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
1,6-Dinitropyren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
1,8-Dinitropyren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
Nitroterphenyl			+ (#)	+ (#)	IARC 1989, Sellström et al. 1987

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-31: Emissionen an aromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 6

3.5.2 Oxidierte aromatische Nitroverbindungen

Oxidierte aromatische Nitroverbindungen					
	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Methylnitrocarboxyaldehyd-anthracen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
<i>Nitroanthrone /- anthrachinone</i>					
Nitroanthrachinon			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
1-Nitroanthrachinon			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Nitroanthron			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Nitrobenzanthron			+ (#)	+ (#)	Enya et al. 1997
Nitrochinonfluoranthen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
<i>Nitrofluorenone</i>					
Nitrofluorenon			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
2-Nitro-9-fluorenon				+	IARC 1989
3-Nitrofluorenon			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983, IARC 1989
Methylnitrofluorenon			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
2,5-Dinitro-9-fluorenon				+	IARC 1989
2,7-Dinitrofluorenon			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983, IARC 1989
2,4,7-Trinitro-9-fluorenon				+	IARC 1989

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-32: Emissionen an oxidierten aromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben), Teil 1

Oxidierte Aromatische Nitroverbindungen (Forts.)					
	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Nitronaphthachinon			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
<i>Oxidierte Nitronaphthaline</i>					
Nitrodihydroxynaphthalin			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Nitronaphthalindicarbonsäure			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
3-Nitro-1,8- naphthalinsäureanhydrid				+	IARC 1989
Nitrophenanthron			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Nitropyrenchinon			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
<i>Oxidierte Nitropyrene</i>					
3-Acetoxy-1-nitropyren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
3-Hydroxy-1-nitropyren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989
1,3-Dihydroxynitropyren			+ (#)	+ (#)	IARC 1989

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-32: Emissionen an oxidierten aromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben), Teil 2

3.5.3 Heteroaromatische Nitroverbindungen

Heteroaromatische Nitroverbindungen					
	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
5-Nitrochinolin			+	+	IARC 1989
8-Nitrochinolin			+	+	IARC 1989
Nitrobenzochinolin			+	+	IARC 1989
Nitrodibenzothiophen [2 Isomere]			+	+	IARC 1989

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-33: Emissionen an heteroaromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben)

3.6 Schwefelhaltige aromatische Verbindungen (PASK)

Mineralölprodukte, wie Dieseltreibstoff und in sehr viel geringerem Maße Benzin, enthalten Schwefel in Form von organischen Verbindungen, wie z. B. aromatische Schwefelheterozyklen. Sie können von Motoren zum Teil unverbrannt ausgestoßen werden oder sich in gleicher Weise wie die gründlicher untersuchten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe bei der Verbrennung neu bilden. Aufgrund des höheren Schwefelgehaltes in Diesel emittieren Fahrzeuge mit solchen Motoren die meisten Schwefelaromaten, auch nitrierte Schwefelaromaten (s. Tabelle 3-34 und Tabelle 3-36).

Bezüglich der toxikologischen Wirkungen ist die Gruppe der schwefelhaltigen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PASK) bei weitem nicht so detailliert untersucht wie die eng verwandte Gruppe der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK).

Es liegen aber ausreichend viele Daten vor, um die Aussage zu rechtfertigen, dass sie mindestens die gleiche kanzerogene und/oder mutagene Wirkung besitzen, wie sie bei den vergleichbaren PAK vorhanden ist.

Die Drei-Ring-Schwefelaromaten sind ebenso wie die Methyldibenzothiophene nicht mutagen. Höhere PASK zeigen in Kurzzeittestsystemen (Ames-Test) eine mutagene Wirkung, wobei die Aktivität sowohl vom nicht schwefelhaltigen Teil des Moleküls als auch von der Stellung des Schwefelatoms abhängig ist.

3.6.1 Schwefelhaltige Heterozyklen (PASK)

Schwefelhaltige Heterozyklen (PASK)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Benzothiazol	+ **	+	+	+	UBA Umwelt 1998
Methylmercaptobenzothiazol	+ **	+	+	+	UBA Umwelt 1998
Benzo[b]naphtothiophene	+	+	+	+	Simoneit 1998
Benzonaphthothiophen	+	+	+	+	IARC 1989
Benzonaphto(2,1-d)thiophene	0,5	5	$5 \pm 1,5$		Norem 1998
<i>Benzothiophene</i>					
Benzo[def]dibenzothiophen			+		IARC 1989
Carboxyaldehyddibenzothiophen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Dibenzo[b,d]thiophen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Dibenzothiophen	0,05				Westerholm et al. 1996
Methyldibenzothiophen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983, IARC 1989
3-Methyldibenzothiophen				0,1	Sjögren et al. 1996
4-Methyldibenzothiophen				0,5	Sjögren et al. 1996
Dimethyldibenzothiophen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Tetramethyldibenzothiophen			+ (#)	+ (#)	Claxton 1983
Ethyldibenzothiophen			+ (#)	(#)	IARC 1989

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabw. **: durch Reifenabrieb freigesetzt

+ : im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zw. diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-34: Emissionen an schwefelhaltigen heterozyklischen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1

Schwefelhaltige Heterozyklen (PASK) (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
Phenanthro[4,5-bcd]thiophen	+	+	+#	+#	Simoneit 1998
Thioxanthon			+#	+#	Claxton 1983

+ : im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar #: in der Literatur wurde nicht zw. diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-35: Emissionen an schwefelhaltigen heterozyklischen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben), Teil 2

3.6.2 Nitrierte PASK (Nitro-PASK)

Nitrierte schwefelhaltige Heterozyklen					
	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
Alkyl-(C4)-Nitrobenzothiophen			+		Sellström et al. 1987
Methylnitrodibenzothiophen			+		Sellström et al. 1987
Methylnitronaphthothiophen			+		Sellström et al. 1987
Nitrodibenzothiophen			+		Sellström et al. 1987
Nitronaphthothiophen			+		Sellström et al. 1987

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

Tabelle 3-36: Emissionen an nitrierten PASK von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in µg/km)

3.7 Halogenhaltige Verbindungen

Von den halogenhaltigen Verbindungen, die von Kraftfahrzeugen emittiert werden, sind die "Dioxine" am besten untersucht.

Polychlorierte Dibenz-p-dioxine und Dibenzofurane ("Dioxine") sind eine Gruppe von chlorierten organischen Verbindungen, die insgesamt 210 Verbindungen (135 polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) und 75 polychlorierte Dibenz-p-dioxine (PCDD), sogenannte "Kongenere") umfasst. Die Kongenere unterscheiden sich in Zahl und Stellung der Chloratome. Neben den chlorierten Vertretern kommen auch bromierte und gemischt halogenierte (Brom / Chlor) Analoge vor (Bezeichnung: PXDF / PXDD, X = Cl, Br).

Bei den polyhalogenierten Dibenz-p-dioxinen (PXDD) und Dibenzofuranen (PXDF) handelt es sich um Substanzen mit fast ausschließlich anthropogenem Ursprung. Lediglich bei natürlichen Verbrennungsprozessen, wie z.B. Waldbrände, können ebenfalls Dioxine entstehen. Sie wurden industriell nie gezielt synthetisiert, sondern treten stets als Nebenprodukte auf.

Grundsätzlich können die Emissionsquellen in drei Gruppen eingeteilt werden:

- industrielle Quellen (Prozesse und Produkte der Halogenchemie)
- thermische Prozesse (Bildung im Rahmen der Chemie der unvollständigen Verbrennung); hierzu zählen auch Verbrennungsmotoren
- Sekundärquellen (z.B. Remobilisierung aus Deponien, Altlasten).

Polychlorierte Dibenz-p-dioxine und Dibenzofurane (PCDD / PCDF) können unter geeigneten Bedingungen in Anwesenheit von anorganisch oder organisch gebundenem Chlor bei praktisch allen Verbrennungsprozessen entstehen.

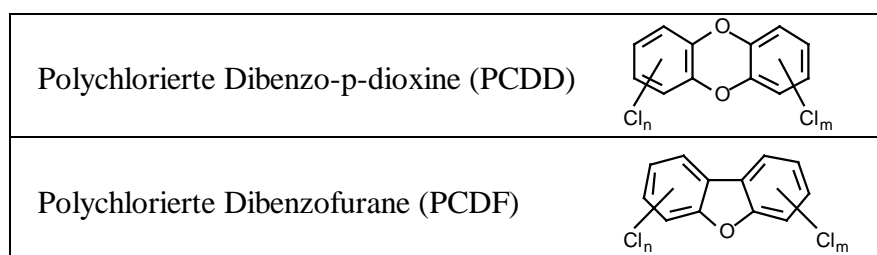


Tabelle 3-37: Strukturformeln der polychlorierten Dibenz-p-dioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF)

Dioxine zeichnen sich durch eine sehr hohe akute Toxizität aus und wirken im Tierversuch immuntoxisch, reproduktionstoxisch und kanzerogen. Sie haben eine starke tumorpromovierende Wirkung. Die toxische Aktivität der einzelnen Kongenere ist sehr unterschiedlich; insgesamt sind die in 2, 3, 7 und 8-Stellung substituierten Moleküle die biologisch aktivsten, von denen wiederum ist das 2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin das toxischste. Es wurde von der WHO als humankarzinogen (Gruppe 1) eingestuft [IARC 1997].

Da in der Umwelt fast immer Gemische der polychlorierten Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/PCDF) vorkommen, hat man sogenannte Toxizitätsäquivalente eingeführt, um die Wirkungsstärke des gesamten Gemisches bewerten zu können. Die relative toxische Wirkungsstärke der einzelnen Kongenere wird auf das am stärksten wirksame 2,3,7,8-TCDD bezogen und durch einen Toxizitätsäquivalentfaktor (TEF) wiedergegeben (vgl. Tabelle 3-38). Der TEF multipliziert mit der vorliegenden Menge ergibt die toxischen Äquivalente je Kongener, die aufsummiert werden (TEQ).

	WHO-TEF
<i>Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine</i>	
2,3,7,8-Cl ₄ DD	1
1,2,3,7,8-Cl ₅ DD	1
2,3,7,8-substituierte Cl ₆ DD	0,1
1,2,3,4,6,7,8-Cl ₇ DD	0,01
Cl ₈ DD	0,0001
<i>Polychlorierte Dibenzofurane</i>	
2,3,7,8-Cl ₄ DF	0,1
2,3,4,7,8-Cl ₅ DF	0,5
1,2,3,7,8-Cl ₅ DF	0,05
2,3,7,8-substituierte Cl ₆ DF	0,1
2,3,7,8-substituierte Cl ₇ DF	0,01
Cl ₈ DF	0,0001
<i>andere PCDD und PCDF</i>	0

Tabelle 3-38: Toxizitätsäquivalentfaktoren (WHO-TEF) für PCDD und PCDF (1997 festgelegt anlässlich eines Expertentreffens der WHO in Stockholm) [Schrenk & Fürst 1999]

Durchschnittswerte der in der Literatur angegebenen Emissionsfaktoren für Dioxine sind in Tabelle 3-42, Tabelle 3-43 und Tabelle 3-44 wiedergegeben. Die Zahlenwerte geben die mittlere Größenordnung der Emissionsfaktoren an; einzelne Literaturangaben für die gleiche Fahrzeugklasse können ganz erheblich – d. h. um mehrere Größenordnungen – schwanken. Autos ohne Katalysator und Diesel-Lkw weisen die höchsten Emissionsraten auf.

Das früher verwendete bleihaltige Benzin enthält als Additiv das chlorhaltige 1,2-Dichlorethan, welches als Vorläufer zur Bildung von PCDD / PCDF fungiert [Ballschmiter et al. 1990, Bacher et al. 1991]. Verbleites Normal-Benzin ist in Deutschland seit dem 1. Februar 1988 verboten. Seit 25. Juni 1992 dürfen Kraftstoffe zum Betrieb von Kraftfahrzeugen nur noch in den Verkehr gebracht werden, wenn sie keine Chlor- oder Bromverbindungen als Kraftstoffzusatz enthalten (Verordnung über das Verbot von Chlor- und Bromverbindungen als sog. Scavenger im verbleiten Benzin; 19. BImSchV).

Aber auch unverbleites Benzin und Dieselmotorkraftstoff enthalten noch Chlorverbindungen im unteren mg-Bereich, die zur Bildung von Dioxinen führen. Eine Literaturstudie, die Dioxin-Emissionen verschiedener Fahrzeugkategorien vergleicht, zeigt deutlich, dass Dieselfahrzeuge, vor allem Diesel-Lkw, wesentlich höhere Emissionen an toxischen Äquivalenten aufweisen, als alle anderen Fahrzeuge [Jones 1993]. Die Emissionsfaktoren werden wie folgt angegeben (s. a. erste Zeile in Tabelle 3-44):

Fahrzeugkategorie	EF im Jahr 1990 [pg TEQ / km]	EF im Jahr 2000 (Prognose) [pg TEQ / km]
Pkw mit G-Kat (Ottomotor)	27	27
Pkw ohne G-Kat (Ottomotor)	270	80
leichter Diesel-Lkw	270	80
mittelschwerer Diesel-Lkw	5.400	1.620
schwerer Diesel-Lkw	5.400	1.620
Diesel-Bus	540	540

Tabelle 3-39: Emissionsfaktoren (EF) für PCDD-/PCDF-Emissionen verschiedener Fahrzeugklassen (alle Angaben in pg TEQ / km)

Schwere Lastkraftwagen werden somit als die mit Abstand stärkste Quelle für Dioxine aus dem Verkehrsbereich angesehen [Jones 1993].

Bestätigt werden diese Ergebnisse durch eine neuere japanische Studie, die feststellt, dass Fahrzeuge mit Ottomotor zwar viermal mehr Dioxine insgesamt ausstoßen als Dieselfahrzeuge, dass aber die Dieselmotorgase mehr toxische Kongenere enthalten und einen etwa doppelt so hohen TEQ-Werte aufweisen [Miyabara 1999].

Die gesamten gegenwärtigen Dioxinmissionen des Verkehrs werden vom Umweltbundesamt auf weniger als 1 g TEQ pro Jahr prognostiziert [UBA 1997]. Diese Menge liegt schätzungsweise um den Faktor 10 unter den Emissionen aus Hausbrandfeuerstätten.

3.7.1 Halogenierte Kohlenwasserstoffe und halogenierte PAK

Azyklische, gesättigte halogenierte Kohlenwasserstoffe					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Methylbromid	5				Norem 1998
Chloroform	100				Norem 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

Tabelle 3-40: Emissionen an halogenierten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$)

Halogenierte PAK					
	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Bromfluoren-9-on	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Alsberg et al. 1985

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-41: Emissionen an halogenierten PAK von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben)

3.7.2 Halogenierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane

Polychlorierte Dibenzodioxine					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat pg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat pg/km	Dieselmotor Pkw pg/km	Dieselmotor Lkw pg/km	Literatur
Dibenzo-p-dioxin (C ₁₀ DD)				26.000	Norem 1998
Tetrachlordibenzodioxine (gesamt) (TCDD, C ₄ DD)		100 ¹⁾	10	10	Norem 1998
2,3,7,8-TCDD (C ₄ DD)		5 ¹⁾	0,50	1	Norem 1998
Pentachlordibenzodioxine (gesamt) (PeCDD, C ₅ DD)		100 ¹⁾	5	100	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
1,2,3,7,8-PeCDD (C ₅ DD)		10 ¹⁾	1	5	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
Hexachlordibenzodioxine (gesamt) (HxCDD, C ₆ DD)		100 ¹⁾	5	500	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
1,2,3,4,7,8-HxCDD (C ₆ DD)		5 ¹⁾	0,5	5	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
1,2,3,6,7,8-HxCDD (C ₆ DD)		10 ¹⁾	1	10	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
1,2,3,7,8,9-HxCDD (C ₆ DD)		5 ¹⁾	0,5	10	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
Heptachlordibenzodioxine (gesamt) (HpCDD, C ₇ DD)		50 ¹⁾	10	500	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD (C ₇ DD)		50 ¹⁾	10	100	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagemmaier et al. 1990
Octachlordibenzodioxin (OCDD, C ₈ DD)		50 ¹⁾	50	500	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen 1) keine Angaben über die Benzinsorte

Tabelle 3-42: Emissionen an PXDD von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in pg/km), Teil 1: PCDD

Polyhalogenierte Dibenzodioxine					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat pg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat pg/km	Dieselmotor Pkw pg/km	Dieselmotor Lkw pg/km	Literatur
Dibromdibenzodioxin (gesamt) (DBDD, Br ₂ DD)		20.000 ¹⁾			Norem 1998
Tribromdibenzodioxin (gesamt) (TrBDD, Br ₃ DD)		10.000 ¹⁾		5.000	Norem 1998
Tetrabromdibenzodioxin (gesamt) (TBDD, Br ₄ DD)		1000 ¹⁾		100	Norem 1998
Polyhalogenierte Dibenzodioxine (gesamt) (PXDD)	500	100.000 ²⁾	1.500	1.500	Schwind et al. 1991
Polyhalogenierte Dibenzodioxine (gesamt) (PXDD)	50.000	5.000.000 ²⁾	5.000	50.000	UBA 1997, SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

1) keine Angaben über die Benzinsorte

2) verbleites Benzin

Tabelle 3-42: Emissionen an PXDD von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in pg/km), Teil 2: PBDD und PXDD

Polychlorierte Dibenzofurane					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat pg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat pg/km	Dieselmotor Pkw pg/km	Dieselmotor Lkw pg/km	Literatur
Dibenzofuran (Cl ₀ DF) (gesamt)				2.800	Norem 1998
Tetrachlordibenzofurane (gesamt) (TCDF, Cl ₄ DF)		1000 ¹⁾	50	100	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
2,3,7,8-TCDF (Cl ₄ DF)		50 ¹⁾	10	50	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
Pentachlordibenzofurane (gesamt) (PeCDF, Cl ₅ DF)		500 ¹⁾	50	100	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagemmaier et al. 1990
1,2,3,7,8-PeCDF		50 ¹⁾	5	5	Norem 1998
1,2,3,7,8-PeCDF, 1,2,3,4,8-PeCDF				10	Geueke et al. 1999, Hagen- maier et al. 1990
2,3,4,7,8-PeCDF		10 ¹⁾	1	10	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
Hexachlordibenzofurane (gesamt) (HxCDF, Cl ₆ DF)		100 ¹⁾	10	100	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
1,2,3,4,7,8-HxCDF (Cl ₆ DF)		50 ¹⁾	1	5	Norem 1998
1,2,3,4,7,8-HxCDF, 1,2,3,4,7,9-HxCDF				50	Geueke et al. 1999, Hagen- maier et al. 1990
1,2,3,6,7,8-HxCDF (Cl ₆ DF)		50 ¹⁾	1	10	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
1,2,3,7,8,9-HxCDF (Cl ₆ DF)		5 ¹⁾	0,50	5	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
2,3,4,6,7,8-HxCDF (Cl ₆ DF)		50 ¹⁾	1	10	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen 1) keine Angaben über die Benzinsorte

Tabelle 3-43: Emissionen an PXDF von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in pg/km), Teil 1: PCDF

Polychlorierte Dibenzofurane (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat pg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat pg/km	Dieselmotor Pkw pg/km	Dieselmotor Lkw pg/km	Literatur
Heptachlordibenzofurane (gesamt) (HpCDF, Cl ₇ DF)		100 ¹⁾	10	100	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF		100 ¹⁾	5	50	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF		5 ¹⁾	0,50	5	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990
Octachlordibenzofuran (OCDF, Cl ₈ DF)		50 ¹⁾	50	50	Norem 1998, Geueke et al. 1999, Hagenmaier et al. 1990

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

1) keine Angaben über die Benzinsorte

Tabelle 3-43: Emissionen an PXDF von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in pg/km), Teil 2: PCDF (Forts.)

Polyhalogenierte Dibenzofurane					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat pg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat pg/km	Dieselmotor Pkw pg/km	Dieselmotor Lkw pg/km	Literatur
Dibromdibenzofurane (gesamt) (DBDF, Br ₂ DF)		551.000 ¹⁾			Norem 1998
Tribromdibenzofurane (gesamt) (TrBDF, Br ₃ DF)		100.000 ¹⁾		100	Norem 1998
Tetrabromdibenzofurane (gesamt) (TBDF, Br ₄ DF)		10.000 ¹⁾			Norem 1998
Pentabromdibenzofurane (gesamt) (PeBDF, Br ₅ DF)				50	Norem 1998
Polyhalogenierte Dibenzofurane (gesamt) (PXDF)	4.000	5.000.000 ²⁾	56.000	56.000	Schwind et al. 1991
Polyhalogenierte Dibenzofurane (gesamt) (PXDF)	5.000.000	50.000.000 ²⁾	500.000	500.000	SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

1) keine Angaben über die Benzinsorte

2) verbleites Benzin

Tabelle 3-43: Emissionen an PXDF von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in pg/km), Teil 3: PBDF und PXDF

PCDD und PCDF: Toxische Äquivalente					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat pg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat pg/km	Dieselmotor Pkw pg/km	Dieselmotor Lkw pg/km	Literatur
Toxische Äquivalente (nach CCMS)	7 ± 5	35 ± 25 ¹⁾ 174 ± 157 ²⁾	241	5.280 ± 2.900	Jones 1993
Toxische Äquivalente		50	5	10	Norem 1998
Toxische Äquivalente				100	Gertler et al. 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichung

1) unverbleites Benzin

2) verbleites Benzin

Tabelle 3-44: Emissionen an toxischen Äquivalenten von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in pg/km)

3.8 Anorganische Verbindungen

3.8.1 Gasförmige anorganische Verbindungen

Von der Menge her sind die in Tabelle 3-45 und Abbildung 3-9 dargestellten Gase die wichtigsten anorganischen Emissionen von Kfz. Der Ausstoß von Kohlendioxid ist direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch (im Durchschnitt entstehen aus einem kg Benzin 3.0885 kg CO₂ und aus einem kg Diesel 3.1171 kg CO₂ [HBEFA 1995]). Der Einsatz eines Abgaskatalysators vermindert die Emission von Kohlendioxid nicht.

Kohlenmonoxid wird von Ottomotoren in höherem Maße produziert als von Dieselmotoren und lässt sich durch den Einsatz eines Katalysators nur um ca. 68% reduzieren.

Effektiver lassen sich die Stickoxide durch katalytische Abgasreinigung reduzieren (um 83%). Sie entstehen in hohem Maße bei Dieselmotoren, für die es noch keine im Alltag angewendete NO_x-Reduktionstechnik gibt. Entsprechend hoch sind die Emissionen, die bei Lkw im Durchschnitt bei 21 g/km liegen (vgl. Tabelle 3-45 und Abbildung 3-9).

Aufgrund des höheren Schwefelgehaltes von Dieselmotoren entstehen bei Dieselfahrzeugen etwa zehnmal höhere Mengen an Schwefeldioxid als bei Benzinfahrzeugen. Der Katalysator reduziert SO₂ im Schnitt nur um 42%.

Verbindung	Emissionsfaktoren in mg/km				Reduktion durch G-Kat	
	Pkw mit G-Kat	Pkw ohne G-Kat	Diesel-Pkw	Diesel-Lkw	um... %	auf...%
Kohlendioxid (CO ₂)	107.500	100.000	100.000	436.500	-	108
Kohlenmonoxid (CO)	3.880	12.000	764	5.340	68	32
Stickoxide (NO _x)	569	3.430	3.760	21.400	83	17
Schwefeldioxid (SO ₂)	29	50	500	500	42	58
Distickstoffoxid (N ₂ O)	57,6	7,5	25,8	27,3	-	769
Ammoniak (NH ₃)	50,4	1,0	1,0	25,0	-	5.037
Summe (ohne Kohlendioxid)	4.582	15.488	5.051	24.692	70	30

Tabelle 3-45: Emissionen anorganischer Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km)

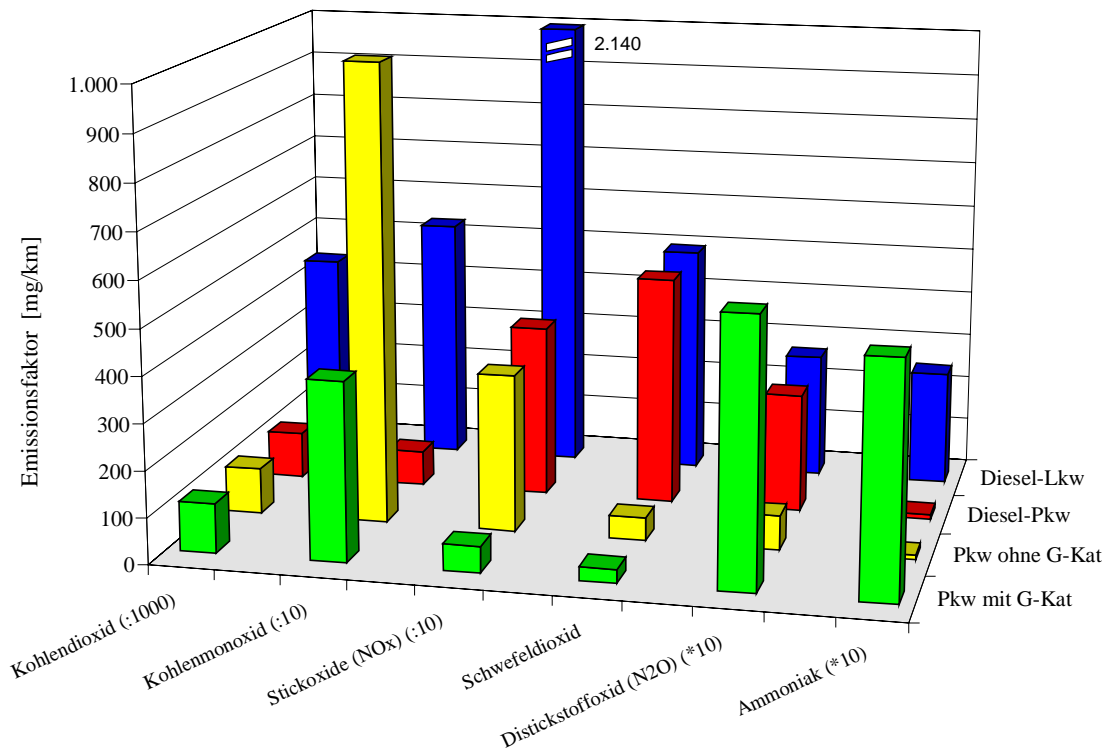


Abbildung 3-9: Durchschnittliche Emissionen anorganischer Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km)

Auffällig sind die erhöhten Emissionen von Distickstoffmonoxid (N_2O , Lachgas) und Ammoniak (NH_3) bei Fahrzeugen mit G-Kat. Offensichtlich läuft die schrittweise Reduktion von NO_2 über NO und N_2O zum erwünschten Stickstoff (N_2) nicht immer vollständig ab. Gründe hierfür können alternde, belegte oder zu kalte Katalysatoren sein. Nicht ideale Reaktionsbedingungen können auch zu einer weiteren Reduktion führen, sodass schließlich im Übermaß Ammoniak (NH_3) entsteht. Im Durchschnitt ergibt sich durch den 3-Wege-Katalysator eine Erhöhung der Distickstoffoxid-Emissionen um das 7,7-fache und eine Erhöhung der Ammoniak-Emissionen um das 50-fache (Tabelle 3-45, Abbildung 3-9).

In Summe reduziert ein geregelter Katalysator die anorganischen Hauptemissionen nur um 70% (ohne Berücksichtigung von Kohlendioxid; siehe letzte Zeile in Tabelle 3-45). Die anorganischen Emissionen von Autos mit Katalysator sind vergleichbar mit denen von Diesel-Pkw. Autos ohne Kat liegen um den Faktor 3, Diesel-Lkw um den Faktor 5 darüber.

Gasförmige anorganische Verbindungen					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat mg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat mg/km	Dieselmotor Pkw Mg/km	Dieselmotor Lkw mg/km	Literatur
Ammoniak (NH ₃)	50 ± 40	1	1	25	Norem 1998
Ammoniak (NH ₃)	100 Max.				UBA, SRU 1994
Blausäure (Cyanwasserstoff)	5			1	Norem 1998
Carbonylsulfid (COS)	50				Norem 1998
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	58 ± 40	7 ± 5	26 ± 20	27 ± 12	Norem 1998
Hydrogensulfid (H ₂ S)	+				Norem 1998
Kohlenmonoxid (CO)	3.880 ± 3.260	12.000 ± 2.930	764 ± 176	6.400 ± 3.273	Ramamurthy et al. 1999, Duffy et al. 1999, Lenaers 1996, Pierson et al. 1996, Staehelin et al. 1997, Coburn et al. 1998, SRU 1994, Victorin et al. 1998, IARC 1989, Norem 1998, Lowenthal et al 1994, Lohmeyer 1991
Kohlendioxid (CO ₂)	108.000 ± 43.300	100.000	100.000	437.000 ± 314.000	Ramamurthy et al. 1999, Duffy et al. 1999, Pierson et al. 1996, Funasaka et al. 1998, BUWAL 1997

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

Max.: höchster in der Literatur angegebener Emissionsfaktor

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

Tabelle 3-46: Emissionen an gasförmigen anorganischen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km), Teil 1

Gasförmige anorganische Verbindungen (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat mg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat mg/km	Dieselmotor Pkw mg/km	Dieselmotor Lkw mg/km	Literatur
Stickstoffoxide (NO _x = NO + NO ₂)	569 ± 401	3.430 ± 1.460	3.760 ± 4.1600	21.400 ± 22.500	Ramamurthy et al. 1999, Duffy et al. 1999, Lenaers 1996, Staehelin et al. 1997, Coburn et al. 1998, BUWAL 1997, Westerholm et al. 1996, UBA, LfU, StaLA, SRU 1994, Victorin et al. 1988, IARC 1989, Sjögren et al. 1996
Schwefeldioxid (SO ₂)	29 ± 21	50	500	500	UBA, LfU, StaLA, SRU 1994, Staehelin et al. 1998, Norem 1998
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	+	+			SRU 1994, Watts et al. 1999

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-46: Emissionen an gasförmigen anorganischen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km), Teil 2

Sonstige anorganische Verbindungen und Elemente					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat mg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat mg/km	Dieselmotor Pkw mg/km	Dieselmotor Lkw mg/km	Literatur
Ammonium (NH ₄ ⁺)	100			500	Lowenthal et al. 1994
Chlorid (Cl ⁻)		0,05			Norem 1998
Cyanid (CN ⁻)	0,1	10	0,1		SRU 1994
EC (elementarer Kohlenstoff)			70	100	Lowenthal et al. 1994, Kerminen et al. 1997
Fluorid (F ⁻)	+ (#)	+ (#)			Silva et al. 1997
Nitrat (NO ₃ ⁻)	+	0,05		0,5	Norem 1998, Silva et al. 1997, Lowenthal et al. 1994
Nitrate in Partikeln				1	Sjögren et al. 1996
Partikel	6 ± 3	100	100	500	Ramamurthy et al. 1999, BUWAL 1997, Claxton 1983, IARC 1989, Westerholm et al. 1996, Reilly et al. 1998, Sjögren et al. 1996, Victorin et al. 1998, Hitzler & Essers 1997, SRU 1994, Norem 1998

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-47: Emissionen an sonstigen anorganischen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km), Teil 1

Sonstige anorganische Verbindungen und Elemente (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat mg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat mg/km	Dieselmotor Pkw mg/km	Dieselmotor Lkw mg/km	Literatur
Phosphor (P)				0,1	Lowenthal et al. 1994
Schwefel (S)				5	Lowenthal et al. 1994
Silicium (Si)				0,1	Lowenthal et al. 1994
Sulfat (SO ₄ ⁻)	1	0,65 ± 0,24	5	19,59 ± 12,11 mg/kWh	Norem 1998, Lowenthal et al. 1994, SRU 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen oder Mittelwerte mit Standardabweichungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-48: Emissionen an sonstigen anorganischen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km), Teil 2

3.8.3 Metalle

Mögliche Ursachen für die Freisetzung von Metallen durch Kfz sind:

- im Kraftstoff gelöste Metalle bzw. Metallverbindungen
- Freisetzung von Metallen aus den Wänden von Tank, Motor, Auspuff etc.
- Freisetzung von (Edel-)Metallen aus der Katalysatoroberfläche
- Abrieb von Reifen
- Abrieb von Bremsbelägen

Auch die angesaugte Verbrennungsluft kann Metalle und Metallverbindungen enthalten, die den Verbrennungsprozess unverändert durchlaufen.

Nach dem Verbot von Blei-haltigem Normalbenzin im Jahre 1988 sind die sehr hohen verkehrsbedingten Emissionen dieses Schwermetalls stark zurückgegangen. In den letzten Jahren hat man verstärkt die Freisetzung von Platin, Palladium und anderen Edelmetallen aus Abgaskatalysatoren, sowie ihre möglichen Umweltauswirkungen studiert [siehe Cubelic et al. 1997, Hees et al. 1998, Helmers & Kümmerer 1999, Helmers & Mergel 1997, Helmers E, 1997, Helmers et al. 1994, Helmers et al. 1998, Laschka et al. 1996, Lustig et al. 1997, Schäfer 1998, Steubing & Vogel 1998, Wäber et al. 1996, Zereini et al. 1993, Zereini et al. 1997, Zereini et al. 1998]:

Beim Fahren werden die Edelmetalle des Abgaskatalysators in kleinen Mengen freigesetzt. Die aktuelle Gesamtemission in Deutschland wird auf 200 bis 500 kg Pt pro Jahr geschätzt. Es wird geschätzt, dass bis zum Jahr 2018 in Deutschland etwa 2 Tonnen Platin aus Abgaskatalysatoren in die Umwelt freigesetzt werden. Seit Beginn der 90er Jahren werden deutliche Anreicherungen von Platin im Boden und in Gräsern entlang stark befahrener Autobahnen, sowie in Klärschlammasche festgestellt. Zwischen 1992 und 1995 haben sich die Platineinträge am Straßenrand in etwa verdoppelt und spiegeln damit die entsprechende Entwicklung des Anteils der Katalysatorfahrzeuge am Gesamtfahrzeugbestand wider. Die Belastung verkehrsnaher Böden liegt um den Faktor 100 - 1000 über den geogenen Hintergrundwerten. 1995 wurden auf und neben der Bundesautobahn A8 bei Stuttgart-Vaihingen vergleichsweise hohe Edelmetallgehalte gemessen, die sich nicht allein durch das Verkehrsaufkommen erklären lassen (ca. 120.000 Fahrzeuge pro Tag), sondern wahrscheinlich auf die hier überdurchschnittlich hohe Stauhäufigkeit und -dauer zurückzuführen sind.

Neben dem Verkehr als Hauptquelle für steigende Platingehalte in Umweltproben kommen noch andere primäre und sekundäre Quellen in Frage, z. B. Industrie, Krankenhäuser (manche Zytostatika enthalten Platinverbindungen) oder Klärschlamm. Bislang liegt keine detaillierte Auflistung und Quantifizierung der Emissionsquellen vor.

Toxikologische und ökotoxikologische Wirkungen des in der Umwelt vorkommenden Platins sind bisher unbekannt. Lösliche Salze von Platin können als starke Allergene wirken; Platin-Zytostatika haben kanzerogenes Potential. Auch wenn bisher keine akuten toxischen Effekte von Platin-Emissionen durch den Verkehr zu erwarten sind, so müssen doch mögliche Langzeiteffekte beobachtet werden. Denkbar ist z. B. die Beeinflussung empfindlicher Stoffkreisläufe in der Natur, etwa durch katalytische Beschleunigung von Reaktionen. Es gibt Belege dafür, dass elementares Platin nach Kontakt mit einem Boden nicht inert bleibt, sondern zu - noch nicht näher charakterisierten - Verbindungen reagiert. Von der vorliegenden Spezies hängt es ab, ob das Platin mobil, pflanzenverfügbar und biologisch aktiv werden kann.

Erhöhte Antimonwerte in Graskulturen an Hauptverkehrsstraßen lassen auf den Straßenverkehr als Quelle (z. B. durch Abrieb von Bremsbelägen) schließen [Wäber et al. 1998, Peichl et al. 1994, Dietl et al. 1998]. Das gleiche gilt für Blei, wobei die Hauptquelle hierfür immer noch verbleiter Kraftstoff für ältere Motoren sein dürfte.

Metalle					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Aluminium	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Helmers 1996
Antimon	+	+	+	+	Peichl et al. 1994
Arsen				1	Lowenthal et al. 1994
Barium				50	Lowenthal et al. 1994
Blei				2	Lowenthal et al. 1994, Silva et al. 1997
Cadmium				10	Lowenthal et al. 1994
Calcium				100	Lowenthal et al. 1994, Silva et al. 1997
Cer	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Silva et al. 1997, Helmerts 1996
Chrom				1	Lowenthal et al. 1994
Cobalt				0,1	Lowenthal et al. 1994
Eisen				100	Lowenthal et al. 1994
Gallium				0,5	Lowenthal et al. 1994
Gold				0,5	Lowenthal et al. 1994
Indium				10	Lowenthal et al. 1994
Iridium	+			0	Zereini et al. 1997
Kalium				10	Lowenthal et al. 1994
Kupfer				10	Lowenthal et al. 1994
Lanthan	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Helmerts 1996

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-49: Emissionen an Metallen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1

Metalle (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Ottomotor Pkw ohne G-Kat $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Pkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Dieselmotor Lkw $\mu\text{g}/\text{km}$	Literatur
Lanthan				50	Lowenthal et al. 1994
Mangan				5	Lowenthal et al. 1994
Molybdän				0,5	Lowenthal et al. 1994, Silva et al. 1997
Neodym	+ (#)	+ (#)	+ (#)	+ (#)	Helmers 1996
Nickel				0,1	Lowenthal et al. 1994
Palladium	0,3 ng/m^3				Helmers et al. 1998, Helmerts 1997, LfU 1995
Palladium				5	Lowenthal et al. 1994
Platin	120 ng/m^3				Helmers et al. 1998, Helmerts 1997, LfU 1995
Platin	+				Silva et al. 1997, Helmerts 1996
Quecksilber	+			0,5	Lowenthal et al. 1994
Rhodium	+				Helmerts 1997, LfU 1995, Zereini et al. 1997
Rubidium	+			0,1	Lowenthal et al. 1994, Zereini et al. 1997
Selen				1	Lowenthal et al. 1994
Silber				5	Lowenthal et al. 1994
Strontium				0,5	Lowenthal et al. 1994
Thallium				0,5	Lowenthal et al. 1994
Titan				1	Lowenthal et al. 1994
Uran				0,1	Lowenthal et al. 1994
Vanadium				0,5	Lowenthal et al. 1994
Ytterbium				0,05	Lowenthal et al. 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

+: im Abgas nachgewiesen aber keine quantitativen Angaben verfügbar

#: in der Literatur wurde nicht zwischen diesen Fahrzeugklassen unterschieden

Tabelle 3-49: Emissionen an Metallen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 2

Metalle (Forts.)					
*	Ottomotor Pkw mit G-Kat µg/km	Ottomotor Pkw ohne G-Kat µg/km	Dieselmotor Pkw µg/km	Dieselmotor Lkw µg/km	Literatur
Zink				500	Lowenthal et al. 1994
Zinn				10	Lowenthal et al. 1994
Zirkonium				1	Lowenthal et al. 1994

*: die Zahlenwerte sind Größenordnungen

Tabelle 3-49: Emissionen an Metallen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 3

4 Neue Technologien zur Emissionsminderung

Nach wie vor sind die Emissionen des Verkehrs in ihrem Einfluss auf die Gesundheit des Menschen und die Funktionsfähigkeit der natürlichen Umwelt zu beachten. Die Kohlendioxid-Emissionen werden aufgrund steigender Verkehrsleistungen insgesamt in den nächsten Jahren weiter ansteigen, wenn auch in abgeschwächter Form. Die Emissionen organischer Verbindungen nehmen dank verbesserter Abgasreinigungstechniken und schärferer Grenzwerte ab. Immer noch stellen die aktuellen Benzol- und Rußwerte in Innenstadtluft ein erhöhtes Krebsrisiko dar. Der "Sommersmog" konnte nicht entscheidend verringert werden.

Vor diesem Hintergrund sind neue technologische Entwicklungen zur Reduktion der Verkehrsemissionen nötiger denn je. Im folgenden soll ein kurzer Überblick über den Stand von Wissenschaft und Technik in diesem Bereich gegeben werden: welche neuen Techniken stehen zur Verfügung? Auf nicht-technische Möglichkeiten der Emissionsminderung – z. B. sparsame Fahrweise, Verhaltensänderungen, verstärkte Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel, Car-Sharing, Tempolimit, Fahrverbote, ökonomische Anreize wie Steuern bzw. Steuererleichterungen, etc. – wird hier **nicht** eingegangen.

4.1 Alternative Kraftstoffe

Durch Änderungen in den heute gebräuchlichen Kraftstoffzusammensetzungen könnten die Emissionen des Straßenverkehrs gesenkt werden. Der Vorteil bei dieser Strategie ist, dass die Emissionsminderungen sofort einsetzen und auch bei Altfahrzeugen wirksam sind. Technische Änderungen am Fahrzeug sind im Regelfall nicht nötig; Ausnahme: Wasserstoff.

In der sehr ausführlichen Studie "Alternative Kraftstoffe - Möglichkeiten zur Minderung der VOC-Emissionen im Straßenpersonenverkehr von Baden-Württemberg" [Krüger et al. 1997] werden mehrere alternative Kraftstoffe und Antriebe für Straßenpersonenfahrzeuge miteinander verglichen. Die **direkten, spezifischen Emissionen pro Fahrzeug** sowie die **Gesamtemissionen** in Baden-Württemberg an VOC, Methan, CO₂, CO, NO_x, SO₂, und Partikel werden vergleichend bewertet und die jeweiligen VOC-Minderungspotentiale szenarienhaft bis zum Jahre 2010 abgeschätzt. Bei den sog. Gesamtemissionen sind die vorgelagerten emissionserzeugenden Prozesse bei der Bereitstellung der Kraftstoffe (Exploration, Förderung, Trans-

port, Verarbeitung, Synthese, Verteilung) mit berücksichtigt. Im folgenden werden Erkenntnisse dieser und anderer Studien kurz aufgeführt ¹.

4.1.1 Veränderte Zusammensetzung herkömmlicher Kraftstoffe

Durch eine bloße Änderung der Zusammensetzung von Otto- und Dieselmotor – z. B. durch die Absenkung des Aromaten-, Olefin- und Schwefelanteils – lassen sich die direkten Emissionen von Benzol um bis zu 50% (Ottomotor) und von Stickoxiden und Rußpartikeln um bis zu 20% (Dieselmotor) verringern [UBA 1996]. Die VOC-Emissionen könnten um 15% gesenkt werden.

Für das Jahr 2000 wird in der Europäischen Union auf der Basis des europäischen Auto-Öl-Programms eine Richtlinie zu verbesserten Kraftstoffqualitäten erarbeitet.

Die Automobilindustrie fordert die Senkung des Aromaten- und Schwefelgehaltes in Otto- und Dieselmotoren, um verbesserte Abgasreinigungstechniken einsetzen zu können [Gairing 1998].

Auf lange Sicht reicht eine veränderte Zusammensetzung der Kraftstoffe jedoch nicht aus, um die Immissionsziele zu erreichen und dauerhaft zu unterschreiten.

4.1.2 Sauerstoffanreicherung von Benzin bzw. Dieselmotor

Während der letzten zehn Jahre gab es vor allem in den USA große Forschungsanstrengungen in der Automobil- und Mineralölindustrie, um neue, sauerstoffreiche Kraftstoffformulierungen für Pkw und leichte Lkw zu entwickeln (sog. reformulated gasoline, RFG). Man verspricht sich dadurch eine Verringerung der schädlichen Wirkungen der Emissionen aus diesen Kraftstoffen in der Atmosphäre. Sauerstoffhaltige Verbindungen, sog. Oxygenate, werden als Kraftstoffadditive eingesetzt, um die Verbrennung zu verbessern und die Abgase zu vermindern. So werden beim Verbrennen von Benzin mit mindestens 2 Gew.-% Sauerstoffgehalt bis zu 15% weniger Kohlenwasserstoffe im Vergleich zu herkömmlichem Benzin emittiert [Huttunen et al. 1997].

Hoch verzweigte Ether wie Methyl-t-butylether (MTBE), Ethyl-t-butylether (ETBE), Diisopropylether (DIPE) und tert-Amylmethylether (TAME) werden in den USA in

¹ weitere Informationen s. a. http://www.tu-harburg.de/UMWELT98/papers/sektoer_d/beck/main.html

großen Mengen vielen der neuen Formulierungen beigemischt. Diese Ether verbessern die Oktanzahl des Kraftstoffs und aufgrund des gebundenen Sauerstoffs werden die CO-Emissionen gesenkt. Auch der Ausstoß an den toxischen Stoffen Benzol und 1,3-Butadien wird deutlich verringert, allerdings wird mehr Formaldehyd emittiert. Der Einfluss auf das Ozonbildungspotential der gesamten Emissionen von RFG ist Gegenstand aktueller Forschung [Schell & Hass 1998].

Der Einsatz von MTBE ist allerdings für die Umwelt nicht unproblematisch. Die Verbindung wurde inzwischen in ganz Amerika in über einem Viertel der städtischen Grundwasserbrunnen nachgewiesen, wie auch in Trinkwasserspeichern, in Flüssen und Seen, im Regen und im Schnee. Durch Lecks in den Benzintanks der Tankstellen gelangt MTBE ins Grundwasser, durch motorisierte Wasserfahrzeuge in Seen und Wasserspeicher. Bei Tieren kann MTBE Krebs auslösen und zu Missbildungen bei Neugeborenen führen. In der Atmosphäre wird es primär zu tert-Butyl-Formiat abgebaut.

Die tatsächlichen Emissionsänderungen einer gesamten Fahrzeugflotte durch die Einführung von RFG in Kalifornien wurde durch Messungen in einem Straßentunnel in der San Francisco Bay Area in den Jahren 1994 bis 1997 untersucht [Kirchstetter et al. 1999a]. In diesen drei Jahren sanken die Emissionen von CO um $31 \pm 5\%$, von NMVOC um $43 \pm 8\%$ und von NO_x um $18 \pm 4\%$. Die Reduktion der Benzol-Emissionen wird auf 30 – 40% geschätzt. Die Formaldehydwerte stiegen um 10%, während sich die Acetaldehydemissionen nicht signifikant änderten.

In zukünftigen Generationen von Dieselmotoren könnten andere Ether wie Dimethylether (DME), Diethylether (DEE) oder Dimethoxymethan (DMM) als "ultrasaubere" Dieselmotorkraftstoffkomponenten zur Anwendung gelangen, womit Partikelemissionen und Lärm von Dieselmotoren gesenkt werden könnten [Wallington 1998]. Die signifikante Verringerung der Partikelemissionen von Dieselmotoren durch Beimischung von Sauerstoff-haltigen Verbindungen zum Kraftstoff ist jedoch meist mit der gleichzeitigen Zunahme der Stickoxidemissionen verbunden [McCormick et al. 1997].

4.1.3 Alkohole (Methanol, Ethanol)

Methanol kann Benzin bis zu 90%, Diesel bis zu 30% zugemischt werden, ohne dass größere Veränderungen am Verbrennungsmotor nötig werden. Mit Methanol betriebene Ottomotor-Fahrzeuge zeichnen sich gegenüber den Benzinfahrzeugen durch erniedrigte spezifische Emissionen an NO_x , CO, und VOC am Motor aus. Der Anteil an reaktiven Kohlenwasserstoffen mit hohem Ozonbildungspotential und Aromaten

im Abgas ist deutlich geringer [Coburn et al. 1998]. Es wird jedoch deutlich mehr Formaldehyd freigesetzt, vor allem beim Kaltstart. Lkw weisen stark reduzierte Partikel- und niedrigere NO_x -Emissionen auf. Gleichzeitig können die VOC-Emissionen jedoch deutlich steigen. Bei den Gesamtemissionen ergeben sich Verbesserungen bei den NMVOC-Emissionen, kaum Veränderungen beim Primärenergieverbrauch, den CO- und den CO_2 -Emissionen und eine starke Erhöhung der CH_4 -Emissionen, für die die vorgelagerten Prozesse zur Methanolbereitstellung verantwortlich sind. Bei importiertem Methanol verschlechtert sich auch die NO_x -Gesamtbilanz entscheidend.

Auch Ethanol kann im Gemisch mit Benzin oder rein als Motorkraftstoff eingesetzt werden. Die spezifischen VOC-Emissionen sinken um bis zu 50%, vor allem der Anteil der PAK wird stark reduziert; allerdings fallen die Acetaldehydemissionen höher aus als bei reinen Benzinmotoren. Bei den schweren Dieselfahrzeugen werden die Partikel- und die NO_x -Emissionen gesenkt [Coburn et al. 1998]. Ethanol lässt sich aus nachwachsenden Rohstoffen gewinnen. Die Gesamtemissionen an Methan und Stickstoffoxiden sind gegenüber konventionellen Benzinfahrzeugen stark erhöht. Grund dafür ist, wie beim Methanol, die Kraftstoffbereitstellung.

4.1.4 Flüssiggas (LPG) bzw. Erdgas (CNG/LNG)

LPG (liquified petroleum gas, flüssiges Erdölgas) besteht hauptsächlich aus Propan, Butan und Isobutan und wird in etlichen Ländern als Motorkraftstoff eingesetzt. Die Niederlande haben mit 12% Anteil an der Flotte der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge die höchste LPG-Fahrzeug-Dichte. Bei den spezifischen Emissionen ergeben sich Verbesserungen für CO, VOC (- 60%) und NO_x . Es wird extrem wenig Benzol emittiert. LPG-Busse mit regeltem 3-Wege-Katalysator weisen neben nahezu fehlenden Partikel- und SO_2 -Emissionen deutlich geringere NO_x -Emissionen auf. In der Gesamtemissionen-Bilanz ergeben sich niedrigere VOC-Emissionen.

Auch Erdgas (je nach Speichertechnik CNG oder LNG, compressed oder liquified natural gas, genannt) eignet sich gut als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren. Es besteht zu 75 – 98% aus Methan, des weiteren aus Ethan, Propan und Stickstoff und hat eine sehr hohe Oktanzahl. Emissionsseitige Vorteile sind der höhere Wirkungsgrad (weniger Kohlendioxid-Emissionen) und sehr geringe NMVOC-Emissionen (- 90%) mit entsprechend niedrigen Benzol-Werten. Allerdings wird sehr viel mehr Methan emittiert, sodass die Gesamtmenge an VOC gegenüber Benzinfahrzeugen nicht niedriger ist. Bei stöchiometrischer Verbrennung entstehen hohe NO_x -Rohemissionen, bei Magergemisch-Verbrennung kann kein herkömmlicher 3-Wege-

Katalysator eingesetzt werden, was erhöhte Emissionen an NO_x , unverbranntem Methan und anderen VOC zur Folge hat.

In einer vergleichenden Ökobilanz verschiedener Treibstoffe unter den Aspekten Lufthygiene und Klimaschutz schneiden Erdgas und Flüssiggas am besten ab [BUWAL 1998]. Auch eine holländische Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die gasförmigen Kraftstoffe CNG und LPG in allen untersuchten Kategorien besser sind als die flüssigen Kraftstoffe Benzin und Diesel [Rijkeboer & Hendriksen 1993]. Fast immer schneidet CNG besser ab als LPG, außer bei den Partikelemissionen und dem Wintersmogpotential, die beim LPG niedriger sind.

4.1.5 Kraftstoffe aus regenerativen Energiequellen

Die heute am meisten diskutierten Biokraftstoffe sind Ethanol (s. o.), Rapsöl und Rapsölmethylester (RME). Reines Rapsöl lässt sich nur durch Änderungen am Dieselmotor einsetzen und führt zu einer deutlichen Erhöhung der Kohlenwasserstoff- und CO-Emissionen des Motors. Der durch Veresterung gewonnene RME lässt sich in serienmäßigen Dieselmotoren ohne Änderungen einsetzen. Bei den fahrzeugspezifischen Emissionen ergeben sich jedoch keine Vorteile gegenüber Diesel.

Bei den Gesamtemissionen, die auch die vorgelagerten Prozesse zur Gewinnung von RME mit berücksichtigen, ergeben sich gegenüber Dieselmotoren bei keinem Schadstoff Vorteile, lediglich die CO_2 -Emissionen sind geringer, wenn man eine CO_2 -neutrale Verbrennung des nachwachsenden Rohstoffes unterstellt. Besonders die Methan-Gesamtemissionen steigen jedoch sehr stark an.

Das ifeu-Institut hat eine Ökobilanz von RME und Dieselmotoren erstellt, in der der gesamte Lebensweg beider Energieträger miteinander verglichen wird [Reinhardt & Zemanek 1998]. Die abschließende Bewertung dieser Ökobilanz berücksichtigt die "spezifischen Beiträge" und die "ökologische Bedeutung" der einzelnen Umweltwirkungskategorien. Demnach fallen zwei der drei Umweltwirkungskategorien mit großer bis sehr großer ökologischer Bedeutung zugunsten von RME aus, nämlich der Ressourcenverbrauch und der Treibhauseffekt. Auch in der als weniger bedeutenden Kategorie "Öko- und Humantoxizität" weist RME aufgrund geringerer Partikelemissionen Vorteile auf. Beim Ozonabbau, einer Kategorie mit sehr großer ökologischer Bedeutung, schneidet RME aufgrund höherer N_2O -Emissionen schlechter ab Dieselmotoren. Ferner bewirkt die Verwendung von RME ein höheres Versauerungspotential, Ozonbildungspotential und höhere NO_x -Emissionen.

4.1.6 Wasserstoff

Moderne Einspritzmotoren können durch Änderungen an der Gemischbildung und am Einspritzsystem für den Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet werden. Zur Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug bieten sich die Kompression, die Hydridtechnik (Metallhydridspeicher) oder die Verflüssigung (Speicherung bei -253 °C in hochisolierten Behältern) an. Beim Einsatz von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren werden nahezu ausschließlich Wasserdampf und Stickstoffoxide freigesetzt, wobei sich die NO_x -Emissionen durch den Magerbetrieb oder durch die Katalysatortechnik unter das Niveau von heutigen Benzinfahrzeugen reduzieren lassen. Verbleibende Spurenemissionen an VOC und CO entstehen durch mitverbranntes Motorenöl.

Die gesamten, dem Betrieb von Wasserstofffahrzeugen zuzuordnenden Emissionen werden daher wesentlich durch die Wasserstoffbereitstellung bestimmt. Hier schneidet aus Erdgas erzeugter Wasserstoff sowohl aus energetischer Sicht als auch unter Berücksichtigung der Emissionen besser ab als ein elektrolytisch erzeugter, bei dessen Herstellung Verwendung von Strom aus den aktuellen Kraftwerken Baden-Württembergs unterstellt wird. Besonders günstig wirkt sich der Einsatz von Wasserstoff auf die NMVOC- und CO-Gesamtemissionen aus, während die Kohlendioxid-Gesamtemissionen leicht und die Methan-Gesamtemissionen drastisch ansteigen würden.

Auf dem Münchner Flughafen wurde am 5. Mai 1999 die erste öffentliche Wasserstoff-Tankstelle in Betrieb genommen.

4.2 Alternative Antriebs- und Motorenkonzepte ¹

4.2.1 Verbesserte Motoren

Prinzipiell sind heutige Pkw-Motoren sehr groß und leistungsstark gebaut, um eine hohe Beschleunigung und Endgeschwindigkeit zu erreichen. Für die allermeisten Fahrsituationen sind diese Motoren viel zu groß dimensioniert und laufen deshalb die

¹ Selbstverständlich führen auch andere technische Verbesserungen am Fahrzeug, wie z. B. Reduktion des Gewichtes und des Luft- und Rollwiderstandes, Start-Stop- und Schwungnutzsysteme, Verbesserungen des Getriebes, etc. zu einer Verringerung von Verbrauch und Emissionen.

meiste Zeit im Teillastbereich, in dem die chemische Energie sehr ineffizient in Bewegungsenergie umgesetzt wird.

Die Schweizer Firma Swissauto Wenko entwickelte das sog. SAVE-Konzept (für "small advanced vehicle engines"), ein Antriebskonzept zur Reduktion von CO₂- und anderen Abgasemissionen [Martin 1998]. Kernstück ist die Effizienzerhöhung des Motors durch Druckwellenaufladung. Diese und andere technische Optimierung am Fahrzeug erlauben eine Verbrauchsreduktion um 45 bis 60%; anwendbar auf alle Fahrzeuge bis zur oberen Mittelklasse!

Eine Befragung europäischer Fahrzeughersteller zu technischen Verbesserungsmöglichkeiten an Motoren, um die Emissionen zu verringern, ergab folgende Liste [Krüger et al. 1997]:

Benzinfahrzeuge

- elektronisches Motormanagement
- zusätzliche Lufteinblasung
- luftunterstützte Einspritzer
- Weiterentwicklung der Abgasrückführung
- sequentielle Kraftstoffeinspritzung
- Zylinderabschaltung

Dieselfahrzeuge

- elektronisches Motormanagement
- Hochdruckeinspritzung
- erhöhter Zylinderdruck
- Mehrventilmotoren
- Abgasrückführung
- geregelte Ladeluftkühlung
- variabler Ladedruck des Turboladers

Allein durch solche Maßnahmen, kombiniert mit verbesserten Abgasreinigungstechniken (s. Kapitel 4.3), ließen sich die direkten VOC-Emissionen um 60 bis 80% reduzieren. Eine Verbrauchsreduktion von bis zu 49% beim Ottomotor und bis zu 33% beim Dieselmotor ist ebenfalls möglich.

Der europäische Automobilverband ACEA hat sich freiwillig verpflichtet die CO₂-Emissionen der Neuwagenflotte in der EU bis zum Jahre 2008 auf 140 g/km zu reduzieren, was bei benzinbetriebenen Fahrzeugen einem Verbrauch von 6 l/100 km und bei Dieselfahrzeugen von 5,3 l/100 km entspricht. Dies wäre ein 25%iger Rückgang gegenüber dem Ausgangswert von 1995, der bei 186 g/km liegt. Durch technische Optimierung am Benzinmotor sind heute im Schnitt bereits 94 g CO₂/100 km erreichbar.

4.2.2 Elektrofahrzeuge

Beim Betrieb von Elektrofahrzeugen entstehen keine direkten, fahrzeugspezifischen Emissionen. Da Elektromotoren bei Stillstand des Fahrzeuges keine Energie umwandeln, entfällt der Kraftstoffverbrauch an roten Ampeln, im Stau etc..

Durch die Bereitstellung des Stroms entstehen je nach Kraftwerk und je nach Tageszeit, in der die Batterien geladen werden, unterschiedliche Emissionen. Die Gesamtemissionen-Bilanz ist jedoch durchgehend sehr viel besser als bei Benzinfahrzeugen mit Ausnahme von Methan, welches aus entsprechenden Kraftwerken freigesetzt wird.

4.2.3 Hybrid-Antrieb

Bei Fahrzeugen mit Hybridantrieb wird versucht, durch geeignete Kombination von unterschiedlichen Antrieben die jeweiligen Vorteile der einzelnen Antriebe zu verbinden. Meistens werden Elektroantriebe mit Verbrennungsmotoren kombiniert. Hybridfahrzeuge besitzen den wichtigen Vorteil, durch kombinierte Energiewandlung mittels zweier oder mehrerer Technologien sowie durch Nutzung kinetischer, thermischer oder chemischer Energie, den Gesamtwirkungsgrad zu erhöhen und die Emissionen zu minimieren. Verbrennungsmotoren können von den wechselnden Belastungen (Leerlauf, Beschleunigung, Abbremsen, ...) abgekoppelt werden und mit geringer Leistung auf Vollast optimiert werden.

Hybridfahrzeuge weisen bei allen untersuchten Gesamtemissionen sowie beim Primärenergieverbrauch deutlich niedrigere Werte auf als Benzinfahrzeuge.

4.2.4 Brennstoffzellenfahrzeuge

Brennstoffzellen wandeln direkt chemische Energie in Form von Wasserstoff oder Wasserstoff-liefernden Kraftstoffen (Erdgas, Methanol, Benzin) in elektrische Energie um. In Kombination mit Elektroantrieben können Straßenfahrzeuge emissionsarm betrieben werden. Neben dem Einsatz von Wasserstoff als Endenergieträger kann Methanol eingesetzt werden, das als Flüssigkeit mit der bisherigen Infrastruktur zur Kraftstoffverteilung besser kombinierbar wäre. Hierbei wird der für den Betrieb der Brennstoffzellen benötigte Wasserstoff aus dem mitgeführten Methanol mit Hilfe

eines sog. Reformers im Fahrzeug selbst erzeugt. An der Nutzbarmachung von Benzin für Brennstoffzellen wird ebenfalls geforscht.

Die Firma Daimler Chrysler präsentierte im Frühjahr 1999 das Versuchsfahrzeug "Necar 4", ein Wagen der Kompaktklasse, bei dem die Brennstoffzelleneinheit im Fahrzeugboden und der Tank mit flüssigem Wasserstoff im Kofferraum untergebracht werden konnte. Beim Vorläufermodell "Necar 3" war es bereits gelungen, den Wasserstoff an Bord mit Hilfe eines Reformers aus Methanol zu erzeugen. Im Jahr 2004 sollen die ersten Brennstoffzellenfahrzeuge in Serie produziert werden.

Aufgrund des hohen Wirkungsgrades der Brennstoffzelle und des Elektroantriebes werden entsprechende Fahrzeuge geringere Mengen Wasserstoff benötigen als Wasserstofffahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Die Gesamtemissionen an NMVOC, CO, NO_x und CO₂ sind sowohl beim Wasserstoff- als auch beim Methanol-betriebenen Brennstoffzellenfahrzeug deutlich niedriger als bei Benzin-Pkw oder bei Dieseln. Allerdings sind die Methan-Emissionen deutlich höher. Von allen in der Studie "Alternative Kraftstoffe" untersuchten Konzepten schneiden die Brennstoffzellenfahrzeuge (und die Elektrofahrzeuge) im Hinblick auf die Gesamtemissionen mit Abstand am besten ab [Krüger et al. 1997].

Das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung führte im Rahmen des Projektes "Umweltplan Baden-Württemberg" 1998 eine Studie zur Senkung der Straßenverkehrsemissionen durch einen verstärkten Einsatz von Erdgas- und Brennstoffzellenfahrzeugen durch [Krüger et al. 1998]. Darin wurden die Emissionen an VOC, NMVOC, CH₄, CO, NO_x, SO₂, Partikel, CO₂, sowie der Energieverbrauch durch Modellrechnungen bis zum Jahr 2020 für verschiedene Fahrzeugszenarien im Straßenverkehr Baden-Württembergs prognostiziert. Demnach werden nennenswerte Minderungspotentiale durch den verstärkten Einsatz von Erdgas- oder Brennstoffzellenfahrzeugen für NMVOC, CO, NO_x, SO₂ und Partikelemissionen erreicht und liegen maximal bei 27 bis 41% bis zum Jahr 2020. Bei VOC, CO₂ und Energie wird keine Minderung prognostiziert, beim Methan ein starker Anstieg der Emissionen. Unter Berücksichtigung der prognostizierten Emissionen, der relativ hohen Minderungspotentiale bei konventionellem Antrieb und der Kosten, scheint mithin ein verstärkter Einsatz von Erdgas- und Brennstoffzellenfahrzeugen nur in Spezialbereichen sinnvoll (z. B. Busverkehr).

Zu einer ähnlichen Einschätzung gelangt das deutsche Umweltbundesamt [UBA 1999]. Einer vehementen Befürwortung der Brennstoffzelle für die mobile Anwendung im Verkehrsbereich durch die Industrie steht die detaillierte und sogar auf den optimistischen Annahmen von Herstellern basierende Analyse des Umweltbundes-

amtes gegenüber, die das Konzept der Brennstoffzelle im Straßenverkehr derzeit aus Umweltsicht als nicht kosteneffizient betrachtet.

Das UBA hat die Brennstoffzellentechnik als Fahrzeugantrieb einer Analyse und Bewertung unterzogen, um zu ermitteln, welche Vor- und Nachteile aus Sicht des Umweltschutzes sie nach derzeitigem Wissensstand im Vergleich zu konventionellen Antriebskonzepten im Verkehr hat:

Nach den Berechnungen einer Kosten-Nutzen-Analyse auf der Basis der verfügbaren Daten zeichnet sich ab, dass Emissionsminderungen und Ressourcenschutz in den nächsten 10 bis 20 Jahren wesentlich kostengünstiger durch verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor mit niedrigsten Abgasemissionen (ULEV "Ultra Low Emission Vehicle" oder EURO-4 Standard) realisiert werden können als durch Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb.

Da das Brennstoffzellenauto nach Herstellerangaben nicht vor dem Zeitraum 2005/2010 marktreif verfügbar sein wird, aber bereits jetzt der Ausstoß von Kohlendioxid (CO₂) aus dem Verkehr zum Schutz des Klimas dringend erheblich verringert werden muss, sind auf absehbare Zeit nur von der Weiterentwicklung der heutigen, konventionellen Antriebstechniken deutliche und kosteneffiziente Emissionsminderungen zu erwarten.

Die Studie des UBA prognostiziert für zukünftige Pkw mit Verbrennungsmotor gegenüber heutigen Fahrzeugen eine Halbierung des Verbrauches ohne Einschränkung der Nutzungsmöglichkeiten. Daher können alternative Antriebe auch langfristig aus Umweltsicht nur dann erfolgreich sein, wenn deren Primärenergieverbräuche und CO₂-Emissionen bei gleichen oder geringeren Kosten noch günstiger ausfallen.

Positive Beispiele für Weiterentwicklungen im Bereich der Ottomotoren sind die verfügbaren Antriebe mit Benzin-Direkteinspritzung. Die Hubräume der Motoren und ggf. die Zylinderzahl können generell verkleinert werden, möglichst in Kombination mit mechanischer Aufladung, variabler Verdichtung oder variabler Ventilsteuerung. Sinnvoll sind diese Technologien besonders in Kombination mit einer Reduzierung der Fahrwiderstände und des Fahrzeuggewichtes. Die angekündigten „Dreiliterfahrzeuge“ mit Dieselmotoren sind aus Gründen des Gesundheitsschutzes nur in Kombination mit einem Partikelfilter sinnvoll.

Brennstoffzellenfahrzeuge verwenden Wasserstoff oder Methanol als Energieträger, die zunächst selbst mit einem relativ hohen Energieaufwand aus fossilen oder nicht fossilen Energieträgern gewonnen werden müssen. Bis zur angenommenen Markteinführung ca. 2005 werden wegen des technischen Aufwandes und der daraus resultierenden Kosten nur geringfügige Mengen von durch regenerative Energieträger (z.B. Elektrolyse mit Solarstrom, Wasserstoff aus Biomasse) gewonnenen Wasserstoffs zur Verfügung stehen.

Jedoch ist selbst bei einem zukünftig denkbaren Einsatz regenerativer elektrischer Energie für eine Wasserstoffelektrolyse der elektrische Energiebedarf zur Erzeugung und Aufbereitung des Wasserstoffes mindestens doppelt so hoch wie derjenige der Herstellung und Aufbereitung von Benzin aus fossilem Rohöl. Regenerativ erzeugte Elektrizität könnte jedoch wesentlich effektiver direkt genutzt werden und damit andere fossile Energieträger bei der Elektrizitätserzeugung ersetzen.

Aus Sicht des Umweltschutzes ist daher nach heutigem Kenntnisstand der Einsatz von Wasserstoff im Verkehr aufgrund der hohen Energieverluste bei der Herstellung und Aufbereitung des Energieträgers nicht zu befürworten. Auch die Option, aus Erdgas unter hohem Energieverlust Methanol herzustellen, ist nicht zu befürworten, da das Erdgas auch direkt in niedrig emittierenden Verbrennungsmotoren genutzt werden kann. Gleiches gilt für Optionen zur Wasserstoffproduktion aus Biogas.

Die Brennstoffzellentechnologie kann nur dann Vorteile aus energetischer Sicht bringen, wenn die Energieverluste der Treibstoffherstellung (Wasserstoff, Methanol) im Fahrzeug überkompensiert werden. Dies bedeutet: Für die Antriebseinheit im Brennstoffzellenfahrzeug ist mindestens ein um 30 bis 35% höherer Wirkungsgrad im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Benzin oder Erdgasverbrennungsmotor erforderlich, um einen insgesamt höheren Primärenergieverbrauch zu vermeiden. Im Vergleich zu fortschrittlichen Verbrennungskraftmaschinen wird dies aus heutiger Sicht nicht erreichbar sein.

Das mit Wasserstoff aus regenerativ erzeugtem Strom betriebene Brennstoffzellenfahrzeug weist im Vergleich zu allen anderen Fahrzeugtypen die beste Emissionsbilanz auf. Diese Variante realisiert weitgehend ein Nullemissionsfahrzeug, sofern unterstellt wird, dass dem Brennstoffzellenantrieb nur der regenerativ erzeugte Strom zugerechnet wird und die Umweltwirkungen der Herstellung der Anlagen vernachlässigt werden. Bei dem mit Methanol betriebenen Brennstoffzellenfahrzeug treten geringfügige direkte und indirekte Emissionen auf. Hingegen ergeben sich bei dem mit Wasserstoff aus Erdgas betriebenen Brennstoffzellenfahrzeug nur indirekte Emissionen. Obwohl die Emissionsminderungen der Brennstoffzellenfahrzeuge bei den Luftschadstoffen (CO, NO_x, NMVOC, CH₄, SO₂, PM) zunächst eindrucksvoll erscheinen, weist das ULEV-Fahrzeug (Ultra Low Emission Vehicle), dessen Emissionsniveau dem zukünftigen EURO 4 Standard für OttoPkw entspricht, gegenüber einem EURO 2 Pkw bei allen Schadstoffen bereits Emissionsminderungen von bis über 80% auf.

Brennstoffzellenfahrzeuge, deren Treibstoffe aus fossilen Energieträgern bereitgestellt werden, besitzen ein gegenüber Verbrennungsmotoren mit einer energieeffizienten Super-Katalysator-Technologie (3-Liter-Auto mit niedrigsten Emissionen) vergleichbares Minderungspotential für Kohlendioxid, falls Methanol aus Erdgas hergestellt und genutzt wird. Die Verwendung von Wasserstoff kann die CO₂-

Emissionen und den Primärenergieverbrauch noch weiter oder sogar vollständig reduzieren, wenn ausschließlich Solarwasserstoff verwendet wird. Die Vorteile niedriger Kohlendioxidemissionen sind jedoch ausschließlich auf die Verwendung kohlenstoffarmer oder regenerativer Treibstoffe (Erdgas, Solarwasserstoff, Biogas) zurückzuführen. Solche Minderungen sind nicht auf die Eigenschaften des Antriebes zurückzuführen, da diese Treibstoffe auch im Verbrennungsmotor verwendet werden können.

4.2.5 Das Hypercar™

Im Laufe der neunziger Jahre entwickelte das Rocky Mountain Institute das Konzept eines sog. "Hypercars". Es handelt sich um ein in allen Komponenten optimiertes und dadurch hocheffizient arbeitendes Fahrzeug [<http://www.hypercar.com>].

Heutige Autos sind sehr ineffizient. Nur 15-20% der Kraftstoffenergie erreicht tatsächlich die Räder. Der Rest geht als Wärmeenergie durch Aufheizung von Luft, Rädern, Bremsen und Straßen "verloren".

Beim Hypercar werden die vier folgenden Konstruktionsprinzipien miteinander kombiniert, um die Energieverluste so gering wie möglich zu halten.

- ultraleichte Konstruktion:

durch Spezialkunststoffe (Karbonfaser, Glasfaser, Kevlar u. a.), die leicht und gleichzeitig sehr fest und sicher sind. Leichtere Autos kommen mit kleineren Motoren, kleineren Bremsen, kleineren Tanks, etc. aus. So entsteht eine positive Rückkopplung bezüglich des Gewichtes und das Auto kann noch leichter gemacht werden.

- widerstandsarmes Design:

durch weitere Reduktion von Luft- und Rollwiderständen. Vor allem die Wagenunterseite wurde bisher nicht aerodynamisch optimiert.

- Hybrid-elektrischer Antrieb:

kleine Elektromotoren an jeder Achse oder an jedem Rad sorgen für die Bewegung; Bremsenergie kann als elektrische Energie zurückgewonnen werden. Der Strom für die Motoren wird effizient an Bord des Fahrzeuges erzeugt, z. B. durch mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen.

- hocheffiziente Ausstattung:

durch energiesparende Geräte bei Heizung, Kühlung, Beleuchtung, etc.

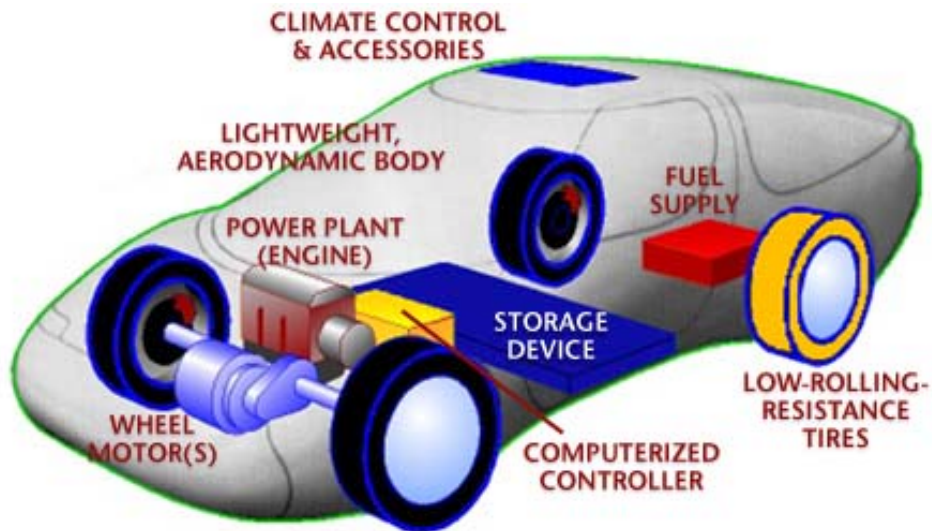


Abbildung 4-1: Auf höchste Energieeffizienz optimierte Komponenten eines Hypercars
[aus <http://www.hypercar.com>]

Alle Komponenten werden in einem durchdachten Konzept aufeinander abgestimmt, sodass sich höchstmöglicher Effizienzgewinn erreichen lässt. Ein Hypercar benötigt das Energieäquivalent von etwa einem Liter Benzin auf 100 km.

Mehr als dreißig Firmen weltweit arbeiten zur Zeit an der Herstellung hocheffizienter Fahrzeuge oder deren Komponenten, darunter die Firmen General Motors, Toyota, DaimlerChrysler, Audi/VW, Ford und Honda. Technisch wurden bereits einige Fahrzeuge realisiert, die dem Hypercar nahe kommen.

Einen interessanten Aspekt erhält das Hypercar-Konzept schließlich auch durch die Idee, Autos nicht nur zur Fortbewegung, sondern die hocheffiziente Energieumwandlung z. B. in Form einer Brennstoffzelle, auch als Kraftwerk zu benutzen. Alle 150 Millionen Autos der USA zusammen könnten theoretisch fünfmal soviel Strom produzieren wie die derzeitigen Kraftwerke zusammen.

4.3 Verbesserte Abgasreinigungstechniken

Die Reinigung des rohen Motorenabgases ist eine typische End-of-pipe-Technologie, die in Ermangelung oder in der Nicht-Durchsetzbarkeit besserer Antriebstechniken ihre Berechtigung hat, um wenigstens die schlimmsten Wirkungen abzumildern. Eine solche Technologie beseitigt jedoch nicht die Ursachen von Umweltproblemen, sondern verlagert zumeist nur die Folgen, schwächt sie bestenfalls ab und erzeugt oft neue Probleme. Als Beispiel hierfür sei die Gewinnung von Platin für Abgaskatalysatoren angeführt (Studie des Öko-Instituts Freiburg [Hochfeld 1997]):

Das zur Schadstoffreduktion in deutschen Autos eingesetzte Platin wird unter großen Umweltbelastungen vor allem in Südafrika, Russland und Kanada gewonnen. Der aufwendige Verhüttungsprozess ist mit hohem spezifischem Energieverbrauch und der Entstehung großer Mengen Schwefeldioxid verbunden. Während in Kanada die Emissionen durch Installation von Rauchgaswaschanlagen vermindert werden konnten, gelangt das Schwefeldioxid im russischen Abbaugbiet weitestgehend ohne Reinigung in die Umwelt und führt zu starker Versauerung und Baumschädigung in einem 80.000 Quadratkilometer großen Gebiet. Mit Hilfe einer Stoffstromanalyse wurde berechnet, dass das durch Reduktion der Stickstoffoxide verringerte Versauerungspotential in Deutschland ¹ durch das bei der Platingewinnung erzeugte Schwefeldioxid in den Erzeugerländern teilweise ausgeglichen wird. Im ungünstigsten Fall wird etwa ein Viertel der eingesparten Emissionen an Säureäquivalenten nicht wirklich vermieden, sondern quasi an den Produktionsstandort exportiert.

Zu technischen Verbesserungsmöglichkeiten an Abgasreinigungssystemen geben europäische Fahrzeughersteller an [Krüger et al. 1997]:

Benzinfahrzeuge

- beheizte Katalysatoren
- verbesserte Katalysatorbeschichtungen
- Oberflächenvergrößerung der Katalysatorbeschichtung
- verlustfreie Abgassysteme
- Niedertemperatur-Lambda-Sonde
- doppelte Lambda-Sonde (vor und nach dem Katalysator)
- Doppelwand-Abgasrohre
- motornahe Anbringung des Katalysators
- Einführung eines On-Board-Diagnosesystems

¹ Saure Niederschläge entstehen sowohl durch die luftchemische Umwandlung von NO_x-Emissionen (zu Salpetersäure) als auch von SO₂-Emissionen (zu Schwefelsäure).

Dieselfahrzeuge

- Partikelfilter
- Oxidationskatalysatoren
- De-NO_x-Katalysatoren

Schließlich wurden zur Reduktion der Verdampfungsemissionen vorgeschlagen (in Deutschland z. T. im Einsatz):

- Aktivkohlefilter
- verlustarme Betankungssysteme

Während bei den verkehrsbedingten Emissionen an CO, VOC und SO₂ ein deutlicher Abwärtstrend zu erkennen ist, bleiben das Kohlendioxid, die Stickstoffoxide und die Rußpartikel weiterhin ein Problem. Die beiden letzteren stammen vorwiegend aus Dieselfahrzeugen. Durch die weitere Verschärfung der Grenzwerte für Dieselmotoren, wie sie in den Abgasrichtlinien der Euro-4 Norm (voraussichtlich ab dem Jahr 2005) vorgesehen sind, müssen neben Maßnahmen am Motor auch zusätzliche wirkungsvolle Sekundärmaßnahmen zur Emissionsminderung herangezogen werden.

Abgasreinigungssysteme für Dieselfahrzeuge sind noch in der Entwicklung; im folgenden Beispiele, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

4.3.1 SCR-Katalysatoren für Lkw

Das bisher aussichtsreichste Verfahren zur Verringerung des Gehalts an Stickstoffoxiden im Dieselausgas stellt die selektive katalysierte Reduktion (SCR) dar. Als Reduktionsmittel können Ammoniak oder Harnstoff fungieren, die mit den unerwünschten Stickstoffoxiden an geeigneten Katalysatoren unter Bildung von möglichst nur Stickstoff und Wasserdampf reagieren.

Ein in der Praxis getestetes System ist der in einem Gemeinschaftsprojekt von Daimler-Benz, Iveco, MAN und Siemens entwickelte SINO_x-Katalysator, der mit einer wässrigen Harnstofflösung arbeitet¹. Er nimmt nicht mehr Platz in Anspruch als ein konventioneller Drei-Wege-Kat für den Ottomotor. Gefertigt wird er aus keramischem Material, im wesentlichen Titanoxid und Wolframoxid. Teure Edelmetalle und Beschichtungen sind nicht erforderlich.

Im Praxistest konnten mit dieser Methode bei Stadtbussen NO_x-Reduktionen von bis zu 70% erreicht werden.

¹ Für die Entwicklung des SINO_x-Katalysators wurde der Philip Morris Forschungspreises 1998 an Dr. Jürgen Zürlig verliehen.

Mit anderen NH_3 -Lieferanten, z. B. dem festen Ammoniumcarbamat, wird experimentiert [Weisweiler & Stieger 1999].

4.3.2 Oxidationskatalysator und Partikelfilter für Dieselfahrzeuge

In stärkerem Maße als bei den Pkw, bei denen deutliche Schadstoffminderungen pro Fahrzeug erreicht wurden, besteht bei den Lkw und Bussen erheblicher Nachholbedarf. Diesel-Lkw und Busse verursachen heute bundesweit 46% des Stickstoffoxid-Ausstoßes des gesamten Straßenverkehrs. Im Innenstadtbereich stammt im bundesweiten Durchschnitt über die Hälfte der gesundheitsbeeinträchtigenden Partikelemissionen von Bussen und Lkw [<http://umweltbundesamt.de/uba-info-presse/pressemitteilungen/p-1596-d.htm>].

Oxidationskatalysatoren können flüchtige Kohlenwasserstoffe um 50 bis 70% gegenüber heutigen, modernen Motoren mindern. Rußfilter sind erfolgreich erprobt und ermöglichen eine Reduktion gesundheitsbeeinträchtigender Partikel um bis zu 90%.

Bereits in den Jahren 1991 bis 1993 haben verschiedene Rußfiltersysteme ihre Praxistauglichkeit im Rußfiltergroßversuch bewiesen, der mit Förderung des Bundesumweltministeriums und des Umweltbundesamtes bei rund 1200 Nutzfahrzeugen durchgeführt wurde. Innermotorische Maßnahmen zur Verbesserung der Verbrennung können zusätzlich zur Schadstoffminderung beitragen.

Bei Rußpartikelfiltern besteht die Gefahr des "Verstopfens", weshalb etwa alle 400 bis 500 Kilometer eine Regeneration notwendig wird. Sensoren erkennen diesen Zeitpunkt; ein Rechner löst zur Temperaturerhöhung der Abgase Nachverbrennungen im Motor und in einem dem Filter vorgeschalteten Oxidationskatalysator aus. Dadurch werden selbst unter ungünstigsten Betriebsbedingungen des Motors 450 Grad erreicht. Wenn Additive zur Absenkung der Verbrennungstemperatur der Rußpartikel zugegeben werden, reicht diese Temperatur aus, um die Partikel zu entfernen. Der gesamte Vorgang dauert zwei bis drei Minuten.

Ein verschärfte Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge wird den Einsatz von Katalysatoren und Filtern auch für Lkw erforderlich machen (s. Kapitel 1.3 auf Seite 19).

5 Schlussbetrachtung

Bei der Anzahl der Straßenkraftfahrzeuge, dem Verkehrsaufkommen und den Fahrleistungen setzt sich ein steigender Trend fort, der schon seit Jahrzehnten anhält. Noch ausgeprägter sind die Steigerungsraten beim Flugverkehr. Dies gilt für Baden-Württemberg, Deutschland und die Europäische Union insgesamt.

Vor diesem Hintergrund haben wir im vorliegenden Arbeitsbericht die Emissionen von Straßenkraftfahrzeugen in größtmöglicher stofflicher Differenzierung aufgelistet. Es ging uns dabei mehr um die Darstellung der Qualität der Emissionen, um die mögliche Identifizierung bisher wenig beachteter Stoffe und Wirkungen, als um genaue quantitative Angaben. Da wir Mittelwerte für die in der Literatur beschriebenen Emissionsfaktoren (im warmen Betriebszustand) angeben, sind die Zahlenangaben stets als Größenordnungen oder mit großen Schwankungsbreiten zu verstehen.

Bei den vom Verkehr verursachten Hauptemissionen ist eine entsprechende Zunahme beim Kohlendioxid festzustellen. Bei den Staubemissionen gibt es eine Verlagerung hin zu feineren Partikeln. Die anderen Emissionen organischer Verbindungen konnten mit Hilfe der Katalysatortechnik gesenkt werden; die der Stickoxide allerdings nur sehr langsam. Einzelne Stoffe werden aber auch erst durch den Katalysator erzeugt (s. u.). Obwohl mit weiteren Emissionsminderungen gerechnet wird, bleibt der Straßenverkehr vorerst Hauptverursacher für die Emissionen an Staub, Kohlenmonoxid, Stickstoffoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen in Baden-Württemberg. Zum Ausstoß des klimawirksamen Kohlendioxids trägt der Straßenverkehr zu 30% bei, Tendenz stark steigend.

Hauptproblembereiche der Verkehrsemissionen sind Gesundheitsschädigungen durch Benzol und Dieselrußpartikel, Bildung von bodennahem Ozon und anderen Photooxidantien durch Stickstoffoxide und organische Verbindungen und die Klimawirksamkeit durch Kohlendioxid.

Bei allen qualitativen und quantitativen Angaben über Emissionen des Verkehrs ist weiterhin stets zu beachten, dass nur das beschrieben wird, was man kennt. Dieser Kenntnisstand hängt sehr oft von den analytisch-chemischen Möglichkeiten ab. Eine große Anzahl bisher unbekannter Verbindungen lässt sich z. B. nicht extrahieren oder analytisch identifizieren. Insofern spiegeln alle in diesem Bericht genannten Stoffe nur das wider, was gemessen wurde.

Umgekehrt gilt auch häufig, dass nur das gemessen wird, was man schon kennt. Der Analytiker sucht gemäß der ihm gestellten Problemstellung oft sehr gezielt nach Einzelstoffen. Alle anderen Verbindungen im Gemisch bleiben unberücksichtigt. Bei keiner Analyse wird jedes Mal die gesamte Stoffpalette erforscht.

In der Gesamtmenge emittierter organischer Stoffe und von Partikelemissionen abgesehen, sind Diesel-Pkw und Pkw mit Katalysator die "saubersten" Fahrzeuge im warmen Betriebszustand. Pkw ohne G-Kat und Diesel-Lkw emittieren 7 bzw. 4,5 mal mehr organische Verbindungen.

In Abgasen von Ottomotoren dominieren die azyklischen, gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffe, sowie die monozyklischen Aromaten. An dieser Zusammensetzung ändert auch die katalytische Abgasreinigung nur wenig: der Anteil der gesättigten Verbindungen steigt, während die ungesättigten und aromatischen Verbindungen abnehmen. Insgesamt stellen aber diese drei Verbindungsklassen den Hauptanteil im Ottomotorabgas mit deutlich über 80%. Alkohole und aromatische Hydroxyverbindungen werden vom Katalysator nur ineffektiv verringert und haben bei Kat-Fahrzeugen einen größeren Anteil, ebenso die Carbonsäuren, deren Anteil von 0,003 auf 0,3% von Nicht-Kat- zum Kat-Fahrzeug ansteigt. Die organischen Säuren sind die einzige von uns identifizierte organische Verbindungsklasse, deren Menge auch absolut ansteigt: Pkw mit Katalysator stoßen mehr Carbonsäuren aus als solche ohne Abgasreinigung. Diese Verbindungen werden durch den oxidativen Katalyseprozess neu gebildet.

Bei den Dieselfahrzeugen stehen sehr deutlich die Aldehyde, insbesondere die azyklischen Aldehyde, im Vordergrund. Bei Diesel-Pkw machen sie insgesamt 54%, bei den Diesel-Lkw 42% der organischen Abgase aus. Absolut gesehen, emittieren Diesel-Pkw etwa gleich viel azyklische Aldehyde wie Otto-Pkw ohne G-Kat, Diesel-Lkw etwa dreimal soviel. Weitere wichtige Verbindungsklassen beim Dieselauto sind azyklische, ungesättigte Kohlenwasserstoffe und aromatische Hydroxyverbindungen. Bei den Lkw haben die reinen Kohlenwasserstoffe und die aliphatischen und aromatischen Hydroxyverbindungen hohe Anteile.

Insgesamt ist in den Abgasen von Verbrennungsmotoren eine sehr breite Palette von organischen Verbindungen nachweisbar. Die folgende Tabelle zeigt die von uns erfassten Verbindungsklassen sowie die wichtigsten Ergebnisse aus Kapitel 3.

Stoffklasse	Kommentar
Nicht-aromatische und monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • von der Gesamtmenge her sehr bedeutend • überwiegend von Ottomotor-Fahrzeugen • Katalysatoreinsatz reduziert um 85%
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Überwiegend von Dieselfahrzeugen • Kanzerogenes Potential • große Stoffvielfalt, v. a. auch bei Alkyl-Substitution
Alkohole und Phenole	<ul style="list-style-type: none"> • bedeutend bei Dieselfahrzeugen (v. a. bei Lkw) • Katalysator bei Ottomotorfahrzeugen hat kaum Reduktionseffekt
Azyklische Aldehyde und Ketone	<ul style="list-style-type: none"> • sehr bedeutend bei Dieselfahrzeugen: Hauptbestandteil des Abgases bei Diesel-Pkw und Diesel-Lkw!
Aromatische Aldehyde und Ketone	<ul style="list-style-type: none"> • bedeutend bei Dieselfahrzeugen
Carbonsäuren	<ul style="list-style-type: none"> • werden durch Katalysator bei Ottomotorfahrzeugen um den Faktor 13 erhöht
Nitroverbindungen	<ul style="list-style-type: none"> • große Stoffvielfalt durch Nitro-Substitution an PAK • bedeutend bei Dieselfahrzeugen • kanzerogenes Potential
Schwefelhaltige Verbindungen	<ul style="list-style-type: none"> • bedeutend bei Dieselfahrzeugen
Halogenhaltige Verbindungen	<ul style="list-style-type: none"> • v. a. bei Dieselfahrzeugen (Diesel-Pkw emittiert 34 mal mehr TEQ als Pkw mit G-Kat) • sehr bedeutend bei Diesel-Lkw (750 mal mehr TEQ als Pkw mit G-Kat)!
Gasförmige anorganische Verbindungen	<ul style="list-style-type: none"> • Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide und Schwefeldioxid stellen Hauptemissionen dar (g/km-Bereich) • bisher keine Reduktion von Kohlendioxid erreicht • Produktion von Lachgas (N₂O) und Ammoniak (NH₃) durch Katalysator • Stickstoffoxide und Schwefeldioxid bei Dieselfahrzeugen bedeutend
Metalle	<ul style="list-style-type: none"> • Edelmetallemissionen durch Katalysator bedeutend

Tabelle 5-1: Im vorliegenden Arbeitsbericht untersuchte Stoffklassen und wichtigste Ergebnisse

Als Felder mit dem größten Handlungsbedarf in Hinblick auf Luftqualität und Treibhauseffekt können identifiziert werden:

- weitere Reduktion von organischen und anorganischen Emissionen insgesamt (die tatsächliche Reduktion der Abgasinhaltsstoffe durch den Katalysator ist weniger effektiv, als häufig angenommen wird: die Emissionen anorganischer Verbindungen werden nur um den Faktor 3 reduziert, die der organischen Verbindungen um den Faktor 7).
- Vermeidung der Produktion von Carbonsäuren, Lachgas und Ammoniak durch den Katalysator.
- besondere Emissionsreduktion bei Dieselfahrzeugen nötig (Katalysatoren, Partikelfilter).
- Erforschung und Reduktion der Dioxinmissionen bei Dieselfahrzeugen, v. a. bei Diesel-Lkw.

Durch erheblichen technischen, materiellen und auch finanziellen Aufwand konnten in letzter Zeit zwar deutliche Verringerungen der Emissionen einzelner Fahrzeuge erreicht werden, diese Reduktionen wurden jedoch durch die Zunahme der Verkehrsleistungen teilweise wieder kompensiert. Nur sehr grundlegende technische Änderungen im Verkehrssystem, z. B. die Abschaffung des Verbrennungsmotors und radikale Gewichtsreduktion der Fahrzeuge, können zu tatsächlich spürbaren Emissionsreduktionen führen. Von den in Kapitel 4 angesprochenen neueren technischen Möglichkeiten ist wohl das Konzept des "Hypercars" am vielversprechendsten.

Obwohl nicht Thema dieses Arbeitsberichtes sei dennoch darauf hingewiesen, dass stets auch nicht-technische Möglichkeiten zur Emissionsminderung – z. B. sparsame Fahrweise, Verhaltensänderungen, verstärkte Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel, Car-Sharing, Tempolimit, Fahrverbote, ökonomische Anreize wie Steuern bzw. Steuererleichterungen, etc. – angewendet werden müssen, um zu einer nachhaltigen Entlastung der Emissionssituation im Verkehrsbereich zu kommen.

Unverdünnte Autoabgase wirken tödlich allein schon aufgrund ihres Gehalts an Kohlenmonoxid, das den Sauerstofftransport im Blut unterbricht. Andererseits funktioniert für den Autoauspuff das Verdünnungsprinzip als Beseitigung immer noch. Hier sollen nicht die Stoffklassen betont werden, die im öffentlichen Bewusstsein noch nicht als Schadstoffe mit dem Straßenverkehr verbunden werden, ihre human-toxikologische und ökotoxikologische Bewertung steht in den meisten Fällen aus.

Konservative Schätzungen, die an der oberen Grenze liegen, sagen 50 Leukämie-
kranke voraus, die ihre Erkrankung auf den Benzolgehalt in der Atemluft zurückzu-
führen haben. So hoch diese Zahl auch ist, sie relativiert sich drastisch gegenüber den
7749 Toten, die 1999 als unmittelbare Opfer von Verkehrsunfällen zu beklagen
waren. Die Lösung kann für beide Problemkreise nur heißen: Nicht ein gegeneinan-
der Aufrechnen, sondern das Instrument Auto und seine Anwendung sicherer und
auch umweltgerechter machen. Generelle Ansätze für den Umweltbereich sind in
diesem Bericht skizziert worden. Es ist keine Prophetie, wenn wir voraussagen, dass
alleine die weiter steigende Zahl der Kraftfahrzeuge eine solche Entwicklung er-
zwingen wird. Die Einstellung der Käufer oder auch der Gesetzgeber aus einer über-
geordneten Verantwortung heraus mag diese Entwicklung beschleunigen können.

6 Literatur

- Alexopoulos, A., Assimacopoulos, D., and Mitsoulis, E. (1993), "Model for traffic emissions estimation", *Atmos. Environ.*, **27**(4), 435-446
- Alsberg, T., Stenberg, U., Westerholm, R., Strandell, M., Rannug, U., Sundvall, A., Gustafsson, J.A., Egebäck, K.E., Tejle, G. (1985), "Chemical and Biological Characterization of Organic Material from Gasoline Exhaust Particles"; *Environ. Sci. Technol.*, **19**, 43-50
- Altaf, W. J. (1997), "Effect of motorway traffic emissions on roadside wild-plants in Saudi Arabia", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **217**(1), 91-94
- Andersson, J. T., Götting, S., Sielex, K. (), "Polychlorierte Dibenzothiophene bei der Pyrolyse von großtechnischen Gummiabfällen"
- Andre, M., Olivier, D., and Pruvost, C. (1995), "Impact of traffic regulation improvement on energy consumption and pollutant emissions from passenger cars", *Sci. Total. Envir.*, **169**(1-3), 273-282
- Anker, W., Gebefügi, I., Lörinci, G., Prechtel, F., and Rabl, P. (1996), "Aldehyd-Immissionen in verkehrsbelasteten Bereichen der Münchener Innenstadt [Emissions of aldehydes at traffic-related sites in the city of Munich]", *Gefahrst. Reinhalt. Luft.*, **56**(7-8), 291-293
- Bacher, R., Riehle, U., Swerev, M., Ballschmiter, K. (1991) "Patterns and Levels of Polyhalogenated (Br-, Cl-) Dibenzodioxins and Dibenzofurans in Automobile Traffic Related Samples", *Chemosphere*, **23**, 1151-1171
- Bagley, S. T., Gratz, L. D., Johnson, J. H., and McDonald, J. F. (1998), "Effects of an Oxidation Catalytic Converter and a Biodiesel Fuel on the Chemical, Mutagenic, and Particle Size Characteristics of Emissions from a Diesel Engine", *Envir. Sci. Technol.*, **32**(9), 1183-1191
- Bailey, J. C., Schmidl, B., Williams, M. L. (1990), "Speciated hydrocarbon emissions from vehicles operated over normal speed range on the road", *Atmospheric Environment* **24A**, 43-52
- Baker, J. M., Reeves, C. E., Penkett, S. A., Cardenas, L. M., and Nightingale, P. D. (1998), "An estimate of the global emissions of methyl bromide from automobile exhausts", *Geophys. Res. Lett.*, **25**(13), 2405-2408
- Ballschmiter, K., Bacher, R., Riehle, U., Swerev, M. (1990), "Beitrag der Automobilabgase zu der allgemeinen Umweltbelastung durch polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane", Forschungsbericht Umweltforschung i. A. d.

Bundesministeriums für Forschung und Technologie Nr. 0764004 0; Universität Ulm, Abteilung Analytische Chemie und Umweltchemie

- Basler, E. und Partner AG (1998) "Nachhaltigkeit: Kriterien im Verkehr", Bericht des NFP 41 "Verkehr und Umwelt", Bericht C5, Projektleitung NFP 41 (Hrsg.), Bern, 1998
- Benning, L., Hofzumahaus, A., Kraus, A., and Wahner, A. Borrell, P. M., Borrell, P., Kelly, K., Cvitas, T., and Seiler, W. (1997), "Aldehydes in the Troposphere: Their impact on HOx Chemistry.", Volume 2: Emissions, Deposition, Laboratory Work and Instrumentation (Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere), 203-206 Southampton, Computational Mechanics Publications. Proceedings of EUROTRAC Symposium '96. 3-25-96.
- Berge, T. (1994), "Vehicle-noise-emission limits - influence on traffic noise levels past and future", *Noise. Contr. Eng. J.*, **42**(2), 53-58
- Berube, K. A., Jones, T. P., Williamson, B. J., Winters, C., Morgan, A. J., and Richards, R. J. (1999), "Physicochemical characterisation of diesel exhaust particles: Factors for assessing biological activity", *Atmos. Environ.*, **33**(10), 1599-1614
- Boucher, O. (1999), "Air traffic may increase cirrus cloudiness", *Nature*, **397**, 30-31
- Brasseur, G. P., Cox, R. A., Hauglustaine, D., Isaksen, I., Lelieveld, J., Lister, D. H., Sausen, R., Schumann, U., Wahner, A., and Wiesen, P. (1998), "European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions", *Atmos. Environ.*, **32**(13), 2329-2418
- Brauer, M., Hisham-Hashim, J. (1998), "Fires in Indonesia: Crisis and Reaction", *Envir. Sci. Technol.*, **32**(17), 404A-407A
- Brenner, J., Schade, D. (1997) "Umwelt und Verkehr – eine kritische Bilanzierung", Vortragsmanuskript im Rahmen der Fortbildungsreihe "Umwelt und Verkehr – Leitbilder künftiger Erziehung"
- BUWAL (1995), "Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs im Gubristtunnel", Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, S. 17.
- BUWAL (1996), "Schebestaub – Messung und gesundheitliche Beurteilung", Schriftenreihe Umwelt Nr. 270, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), Bern
- BUWAL (1997): <http://www.admin.ch/buwal/bulletin/1997/d3a09s01.htm>
- BUWAL (1998), "Ökopprofile von Treibstoffen", INFRAS-Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, Umwelt-Materialien Nr. 104, Bern 1998
(s. a. <http://www.admin.ch/buwal/bulletin/1999/d1a13s01.htm>)

- Caprino, L. and Togna, G. I. (1998), "Potential Health Effects of Gasoline and Its Constituents: A Review of Current Literature (1990-1997) on Toxicological Data", *Environ. Health Perspect.*, **106**, 115-125
- Cardelino, C. (1998), "Daily variability of motor vehicle emissions derived from traffic counter data", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **48**(7), 637-645
- Claxton, L.D. (1983), "Characterization of Automotive Emissions by Bacterial Mutagenesis Bioassay: A Review; Environmental Mutagenesis", **5**, 609-631
- Coburn, T. C., Kelly, K. C., and Bailey, B. K. (1998), "Reduction in vehicle emissions attributable to alternative transportation fuels and its prospective impact on air quality and public health", *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, **13**(6), 395-405
- Cubelic, M., Pecoroni, R., Schäfer, J., Eckhardt, J.-D., Berner, Z., Stüben, D. (1997), "Verteilung verkehrsbedingter Edelmetallimmissionen in Böden", *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.*, **9**(5), 249-258
- Derwent, R. G., Davies, T. J., Delaney, M., Dollard, G. J., Field, R. A., Dumitrean, P., Nason, P. D., Jones B. M. R., Pepler, S. A., (2000), „Analysis and interpretation of the continuous hourly monitoring data for 26 C2-C8 hydrocarbons at 12 United Kingdom sites during 1996“, *Atmos. Environ.*, **34**, 297-312
- Dias-Lalcaca, P., Brunner, D., Imfeld, W., Moser, W., and Staehelin, J. (1998), "An Automated System for the Measurement of Nitrogen Oxides and Ozone Concentrations from a Passenger Aircraft: Instrumentation and First Results of the NOXAR Project", *Envir. Sci. Technol.*, **32**(20), 3228-3236
- Dietl, C., Faus-Keßler, T., Wegenke, M., Peichl, L., "Verkehrsbezogene Immissionen und Immissionswirkungen von Antimon und anderen Metallen", Schriftenreihe 153 Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.), München 1998
- Duffy, B. L., Nelson, P. F., Ye, Y., and Weeks, I. A. (1999), "Speciated hydrocarbon profiles and calculated reactivities of exhaust and evaporative emissions from 82 in-use light-duty Australian vehicles", *Atmos. Environ.*, **33**(2), 291-307
- Duffy, B. L., Nelson, P. F., Ye, Y., Weeks, I. A., and Galbally, I. E. (1998), "Emissions of benzene, toluene, xylenes and 1,3-butadiene from a representative portion of the Australian car fleet", *Atmos. Environ.*, **32**(14-15), 2693-2704
- Economopoulos, A. P. (1992), "Dispersion of traffic and space heating emissions in urban settings", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **42**(4), 448-456
- EG 1996: Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften (1996), "Richtlinie 96/69/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Oktober 1996 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emission von Kraftfahrzeugen", *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 282*, Jg. 39, 01.11.96, 64

- Egli, R. A. (1990), "Nitrogen oxide emissions from air traffic", *Chimia.*, **44**(11), 369-371
- Egli, R. A. (1991), "Climate - air-traffic emissions", *Environment*, **33**(9), 2-5
- Ekstrand, S. (1994), "Close range forest defoliation effects of traffic emissions assessed using aerial photography", *Sci. Total. Envir.*, **147**(MAY), 149-155
- Enya, T., Suzuki, H., Watanabe, T., Hirayama, T., Hisamatsu, Y. (1997) "3-Nitrobenzanthrone, a Powerful Bacterial Mutagen and Suspected Human Carcinogen Found in Diesel Exhaust and Airborne Particulates", *Environ. Sci. Technol.*, **31**(10), 2772 -2776
- Flachsbart, P. G. (1995), "Long-term trends in united states highway emissions, ambient concentrations, and in-vehicle exposure to carbon monoxide in traffic", *J. Expos. Anal. Environ. Epidem.*, **5**(4), 473-495
- Fraser, M. P. and Cass, G. R. (1998), "Detection of Excess Ammonia Emissions from In-Use Vehicles and the Implication for Fine Particle Control", *Environ. Sci. Technol.*, **32**(8), 1053-1057
- Fraser, M. P., Cass, G. R., and Simoneit, B. R. T. (1998), "Gas-Phase and Particle-Phase Organic Compounds Emitted from Motor Vehicle Traffic in a Los Angeles Roadway Tunnel", *Envir. Sci. Technol.*, **32**(14), 2051-2060
- Fraser, M. P., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T., and Rasmussen, R. A. (1998), "Air quality model evaluation data for organics. 4. C-2-C-36 non-aromatic hydrocarbons", *Envir. Sci. Technol.*, **31**(8), 2356-2367
- Fraser, M. P., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T., and Rasmussen, R. A. (1998), "Air quality model evaluation data for organics. 5. C-6-C-22 nonpolar and semipolar aromatic compounds", *Envir. Sci. Technol.*, **32**(12), 1760-1770
- Friedrich, R. Borrell, P. M., Borrell, P., Kelly, K., Cvitas, T., and Seiler, W. (1997), "European Emissions - Distribution and Trends", Volume 2: Emissions, Deposition, Laboratory Work and Instrumentation (Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere), 29-34 Southampton, Computational Mechanics Publications. Proceedings of EUROTRAC Symposium '96. 3-25-96.
- Fromme, H. (1998), "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and diesel engine emission (elemental carbon) inside a car and a subway train", *Sci. Total. Envir.*, **217**(1-2), 165-173
- Funasaka, K., Miyazaki, T., Kawaraya, T., Tsuruho, K., and Mizuno, T. (1998), "Characteristics of particulates and gaseous pollutants in a highway tunnel", *Environ. Pollut.*, **102**(2-3), 171-176

- Gairing, M. (1998) "Statements zu Kraftstoff-Themen", Anhörung des Ausschusses für Umwelt und Verkehr zum Thema "Klimaschutz durch Innovation im Kraftfahrzeugbereich" im Landtag von Baden-Württemberg, 28. Juli 1998
- Gertler, A. W., Sagebiel, J. C., Dippel, W. A., and Farina, R. J. (1998), "Measurements of Dioxin and Furan Emission Factors From Heavy Duty Diesel Vehicles", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **48**, 276-278
- Geueke, K. J., Gessner, A., Quass, U., Broker, G., and Hiester, E. (1999), "PCDD/F emissions from heavy duty vehicle diesel engines", *Chemosphere*, **38**(12), 2791-2806
- Gram, F. (1996), "Time variations in traffic and traffic emissions", *Sci. Total. Envir.*, **190**(OCT), 115-118
- Guerra, G., Iemma, A., Lerda, D., Martines, C., Salvi, G., and Tamponi, M. (1995), "Benzene emissions from motor vehicle traffic in the urban area of milan - hypothesis of health impact assessment", *Atmos. Environ.*, **29**(23), 3559-3569
- Guicherit, R. (1997), "Traffic as source of volatile hydrocarbons in ambient air", *The Science of the Total Environment*, **205**, 201-213
- Haglund, E., Alsberg, T., Bergman, A., Jansson, B. (1987), "Analysis of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Air, Snow and in Automobile Exhaust", *Chemosphere*, **16**, 2441-2450
- Haglund, P., Egebäck, K. E., and Jansson, B. (1988), "Analysis of polybrominated dioxins and furans in vehicle exhaust", *Chemosphere*, **17**, 2129-2140
- Harrison, R. M., Deacon, A. R., Jones, M. R., and Appleby, R. S. (1997), "Sources and Processes Affecting Concentrations of PM10 and PM 2.5 Particulate Matter in Birmingham (U.K.)", *Atmos. Environ.*, **31**(24), 4103-4117
- Harrison, R. M., Jones, M., and Collins, G. (1998), "Measurements of the physical properties of particles in the urban atmosphere", *Atmos. Environ.*, **33**(2), 309-321
- Hausberger, S. and Sturm, P. J. (1997), "Growth of traffic emissions in Austria", *Int. J. Veh. Des.*, **18**(3-4), 243-262
- HBEFA (1995), "Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs", Umweltbundesamt, Berlin und INFRAS AG, Bern; CD-ROM, Version 1.1, Okt. 1995
- Heeb, N. V., Forss, A. M., and Bach, C. (1999), "Fast and quantitative measurement of benzene, toluene and C2-benzenes in automotive exhaust during transient engine operation with and without catalytic exhaust gas treatment", *Atmos. Environ.*, **33**(2), 205-215

- Hees, T., Wenclawiak, B., Lustig, S., Schramel, P., Schwarzer, M., Schuster, M., Verstraete, D., Dams, R., and Helmers, E. (1998), "Distribution of Platinum Group Elements (Pt, Pd, Th) in Environmental and Clinical Matrices: Composition, Analytical Techniques and Scientific Outlook", *ESPR - Environ. Sci. & Pollut. Res.*, **5**(2), 105-111
- Helling, J. (1992), "[Acceptance problems in the traffic - reduction of energy demand and CO₂ emissions]", *Brennst. -Warme. -Kraft.*, **44**(3), 90-92
- Helmers, E., Mergel, N. (1997), "Platin in belasteten Gräsern: Anstieg der Emissionen aus PKW-Abgaskatalysatoren. Erster Trend aus direkten Umweltmessungen" (1992-1995), *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.*, **9**(3), 147-148
- Helmers, E., Mergel, N., Barchet, R. (1994), "Platin in Klärschlammmasche und an Gräsern", *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.*, **6**(3), 130-134
- Helmers, E. (1997), "Platinum Emission Rate of Automobiles with Catalytic Converters", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **4**(2), 100-103
- Helmers, E. (1996), "Elements accompanying platinum emitted from automobile catalysts", *Chemosphere*, **33**(3) 405-419
- Helmers, E., Kümmerer, K. (1999), "Anthropogenic Platinum Fluxes: Quantification of Sources and Sinks, and Outlook", *ESPR - Environ. Sci. & Pollut. Res.*, **6**(1), 29-36
- Helmers, E., Schwarzer, M., and Schuster, M. (1998), "Comparison of Palladium and Platinum in Environmental Matrices: Palladium Pollution by Automobile Emissions?", *ESPR - Environ. Sci. & Pollut. Res.*, **5**(1), 44-50
- Heutschi, K. (1995), "A simple method to evaluate the increase of traffic noise emission level due to buildings, for a long straight street", *Appl. Acoust.*, **44**(3), 259-274
- Hitzler, G., Essers, U. (1997), "Ermittlung von Pkw-Emissionsfaktoren für Benzol und Partikel im Ballungsraum", Forschungszentrum Karlsruhe, PEF-Projekt "Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung", Bericht FZKA-PEF 160
- Hochfeld, C. (1997), "Bilanzierung der Umweltauswirkungen bei der Gewinnung von Platingruppen-Metallen für PKW-Abgaskatalysatoren", Werkstattreihe Nr. 101, Öko-Institut, Freiburg
- Hoekmann, S. K. (1992), "Speciated measurements and calculated reactivities of vehicle exhaust emission from conventional reformulated gasolines", *Environmental Science and Technology*, **26**, 1206-1216.

- Höglund, P. G. (1994), "Alternative intersection design - a possible way of reducing air pollutant emissions from road and street traffic?", *Sci. Total. Envir.*, **147**(MAY), 35-44
- Höglund, P. G. and Tornevik, H. (1993), "Calculated emission and measured immission of air pollution related to traffic flow on a motorway", *Sci. Total. Envir.*, **134**(1-3), 139-146
- Höppe, P. (1997) „Ozonwirkungen auf den Menschen – Stand der Wissenschaft“, *Annalen d. Meteorologie*, **33**, 92-99.
- Hoinka, K. P., Reinhardt, M. E., and Metz, W. (1993), "North atlantic air traffic within the lower stratosphere - cruising times and corresponding emissions", *J. Geophys. Res. -Atmos.*, **98**(D12), 23113-23131
- Huttunen, H., Wyness, L.E., Kalliokoski, P. (1997), "Identification of environmental hazards of gasoline oxygenate tert-amyl methyl ether (TAME)", *Chemosphere*, **35**(6), 1199-1214
- IARC monographs on the evaluation of cancerogenic risks to humans (1989), "Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes", International Agency for Research on Cancer, Volume 46; Lyon, France
- IARC monographs on the evaluation of cancerogenic risks to humans (1997), "Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans", International Agency for Research on Cancer, Volume 69; Lyon, France
- IFEU (1995), "Komponenten-Differenzierung der Kohlenwasserstoffemissionen von KFZ", Forschungsbericht 105 06 069 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Endbericht, August 1995, ifeu-Institut Heidelberg
- Israel, G., Pesch, M., and Schlums, C. (1994), "Bedeutung des Reifenabriebs für die Rußemission des Kfz-Verkehrs [The significance of tire wear for traffic generated soot emissions]", *Staub. Reinh. Luft*, **54**(11), 423-430
- John, C., Friedrich, R., Staehelin, J., Schläpfer, K., Keller, C., Stahel, W., and Steinemann, U. (1998), "Emission factors from road traffic from a tunnel study (Gubrist tunnel, Switzerland). Part IV: comparison with dynamometric tests and literature", *in preparation*
- Jones, K.H. (1993), "Diesel Truck Emissions - an Unrecognized Source of PCDD/PCDF Exposure in the United-States", *Risk Analysis*, **13**(3), 245-252
- Joumard, R. and Andre, M. (1990), "Cold start emissions of traffic", *Sci. Total. Envir.*, **93**(APR), 175-182
- Joumard, R., Zafiris, D., and Samaras, Z. (1994), "Comparative assessment of 2 forecasting models for road traffic emissions - a french case study", *Sci. Total. Envir.*, **147**(MAY), 351-358

- Kalivoda, M. T. and Feller, R. (1995), "Atemis - a tool for calculating air traffic exhaust emissions and its application", *Sci. Total. Envir.*, **169**(1-3), 241-247
- Kerminen, V.-M., Mäkelä, T. E., Ojanen, C. H., Hillamo, R. E., Vilhunen, J. K., Rantanen, L., Havers, N., von Bohlen, A., and Klockow, D. (1997), "Characterization of the Particulate Phase in the Exhaust from a Diesel Car", *Environ. Sci. Technol.*, **31**(7), 1883-1889
- Khalili, N. R., Scheff, P. A., Holsen, T. M., "PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions", *Atmospheric Environment*, **29**(4), 533-542.
- Kirchstetter, T. W., Singer, B. C., Harley, R. A., Kendall, G. R., and Traverse, M. (1999a), "Impact of California Reformulated Gasoline on Motor Vehicle Emissions. 1. Mass Emission Rates", *Envir. Sci. Technol.*, **33**(2), 318-328
- Kirchstetter, T. W., Singer, B. C., Harley, R. A., Kendall, G. R., and Hesson, J. M. (1999b), "Impact of California Reformulated Gasoline on Motor Vehicle Emissions. 2. Volatile Organic Compound Speciation and Reactivity", *Envir. Sci. Technol.*, **33**(2), 329-336
- Kleindienst, T. E., Smith, D. F., Hudgens, E. E., Snow, R. F., Perry, E., Claxton, L. D., Bufalini, J. J., Black, F. M., and Cupitt, L. T. (1992), "The photo-oxidation of automobile emissions - measurements of the transformation products and their mutagenic activity", *Atmos. Environ.*, **26A**(16), 3039-3053
- Klingenberg, H. (1996), "Automobile Exhaust Emission Testing - Measurement of Regulated and Unregulated Exhaust Gas Components, Exhaust Emission Tests"; *Springer-Verlag, Berlin*, 220 ff
- Krahl, J., Seidel, H., Jeberien, H.-E., Rückert, M., and Bahadir, M. (1998), "Pilot study: PAH fingerprints of aircraft exhaust in comparison with diesel engine exhaust", *Fresenius. J. Anal. Chem.*, **360**(6), 693-696
- Krawack, S. (1993), "Traffic management and emissions", *Sci. Total. Envir.*, **134**(1-3), 305-314
- Krebs, C. (Hrsg.), "Die ökologische Steuerreform. Was sie ist. Wie sie funktioniert. Was sie uns bringt", 1998, Birkhäuser, Basel
- Krüger, F., Fahl, U., Obermeier, A., Voss, A. (1998), "Strategien zur Senkung der Feinstaub- und anderer Emissionen im Straßenverkehr in Baden-Württemberg durch einen verstärkten Einsatz von Erdgas- und Brennstoffzellenfahrzeugen", Untersuchung im Rahmen des Projektes "Umweltplan Baden-Württemberg " (1013.0/97-3), Zwischenbericht; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart

- Kuprian, M. and Schaub, H. (1998), "Schadstoff-Cocktail Autoabgas - Kohlenwasserstoffe wirken als Pflanzenhormone", *Forstliche Mitteilungen*, **51**(5), 144-146
- Laschka, D., Striebel, T., Daub, J., Nachtwey, M. (1996), "Platin im Regenabfluss einer Straße", *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.*, **8**(3), 124-129
- Lawrimore, J.H., Aneja, V.P. (1997), "A chemical mass balance analysis of non-methane hydrocarbon emissions in North Carolina", *Chemosphere*, **35**(11), 2751-2765
- Lenaers, G. (1996), "On-board real life emission measurements on a 3 way catalyst gasoline car in motor way-, rural- and city traffic and on two euro-1 diesel city buses", *Sci. Total. Envir.*, **190**(OCT), 139-147
- Lenz, H.P., Pucher, E., Kohoutek, P., Rennenberg, H., Hahn, J., Elstner, E.F., Hippele, S. (1993), "Emissionen, Immissionen und Wirkung von Abgaskomponenten" Fortschrittsberichte VDI, Reihe 12, Nr. 183, VDI-Verlag, Düsseldorf
- Leung, P. L. and Harrison, R. M. (1998), "Roadside and in-vehicle concentrations of monoaromatic hydrocarbons", *Atmos. Environ.*, **33**(2), 191-204
- LfU (1995), "Einträge von Platingruppenelementen (PGE) aus Kfz-Abgaskatalysatoren in straßennahe Böden", Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe 1995, *Handbuch Boden*, Band 2
- LfU (1996) "Die Luft in Baden-Württemberg, Jahresbericht 1995", Berichte der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Band 19, Karlsruhe 1996 (<http://www.uis-extern.um.bwl.de/lfu/abt3/luft95/>)
- Li, H., Banner, C.A., Mason, G.G., Westerholm, R.N., Rafter, J.J. (1996), "Determination of polycyclic aromatic compounds and dioxin receptor ligands present in diesel exhaust particulate extracts", *Atmos. Environ.*, **30**(20), 3537-3543
- Li., H.; Banner, C.D.; Mason, G.G.; Westerholm, R.N. and Rafter, J.J. (1996), "Determination of polycyclic aromatic compounds and dioxin receptor ligands present in diesel exhaust particulate extracts", *Atmos. Environ.*, **30**(20), 3537-3543
- Lipfert, F. W. (1998), "Trends in airborne particulate matter in the United States", *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, **13**(6), 370-384
- Liu, D. (1997), "An ATM traffic shaping model: Frames with peak rate emission", *Telecommun. Syst.*, **8**(1), 23-54
- Lohmeyer, A. (1991), in: "Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle", Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-PEF 138 (1996)

- Lowenthal, D. H., Zielinska, B., Chow, J. C., Watson, J. G., Gautam M., Ferguson, D. H., Neuroth, G. R., Stevens K. D. (1994), "Characterization of heavy-duty diesel vehicle emissions", *Atmosp. Environ.*, **28**(4), 731-743
- Lustig, S., Schierl, R., Alt, F., Helmers, E., Kümmerer, K. (1997), "Schwerpunktthema: Platin in Umweltkompartimenten - Deposition, Verteilung sowie Bedeutung für den Menschen und sein Nahrungsnetz: Stand und Forschungsbedarf", *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.*, **9**(3), 149-152
- Lustig, S., Zang, S., Beck, W., Schramel, P. (1997), "Influence of Micro-Organisms on the Dissolution of Metallic Platinum Emitted by Automobile Catalytic Converters", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **4**(3), 141 - 145
- Makela, K. (1995), "Traffic emissions in russia and the baltic states", *Sci. Total. Envir.*, **169**(1-3), 219-229
- MAK-Liste, „List of MAK and BAT Values 1999“, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, Weinheim, 1999.
- Marklund, S., Andersson, R., Tysklind, M., Rappe, C., Egebäck, K. E., Björkman, E., and Grigoriadis, V. (1990), "Emission of PCDDs and PCDFs in gasoline and diesel fueled cars", *Chemosphere*, **20**(5), 553-561
- Marklund, S., Rappe, C., Tysklind, M., and Egebäck, K. E. (1987), "Identification of polychlorinated dibenzofurans and dioxins in exhausts from cars run on leaded gasoline", *Chemosphere*, **16**(1), 29-36
- Martin, R. (1998) "Small Advanced Vehicle Engines - Ein Antriebskonzept zur Reduktion von CO₂- und Abgasemissionen von Ottomotoren für alle Fahrzeugklassen", swissauto Wenko AG, Burgdorf, Schweiz
- McCormick, R.L., Ross, J.D., Graboski, M.S. (1997), "Effect of several Oxygenates on regulated Emissions from heavy-duty Diesel-Engines", *Environ. Sci. Technol.*, **31**(4), 1144-1150
- Metz, N. and Samaras, Z. (1994), "Comparative assessment of 2 forecasting models for road traffic emissions - a german case study", *Sci. Total. Envir.*, **147**(MAY), 339-349
- Metz, N., Schlichter, H., and Schellenberg, H. (1997), "Positive effects of a traffic control system on fuel consumption and exhaust emission on the German A9 autobahn", *Int. J. Veh. Des.*, **18**(3-4), 354-367
- Meyer-Renschhausen, M., von dem Hagen, O. (1998), "Verminderung der Kfz-Emissionen durch ökologische Steuern", *Z. angew. Umweltforsch.*, **11**(2), 213-226
- Mi, H. H., Lee, W. J., Chen, S. J., Lin, T. A., Wu, T. L., and Hu, J. C. (1998), "Effect of the gasoline additives on PAH emission", *Chemosphere*, **36**(9), 2031-2041

- Miguel, A. H., Kirchstetter, T. W., Harley, R. A., and Hering, S. V. (1998), "On-Road Emissions of Particulate Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon from Gasoline and Diesel Vehicles", *Environ. Sci. Technol.*, 32(4), 450-455
- Miyabara, Y., Hashimoto, S., Sagai, M., and Morita, M. (1999), "PCDDs and PCDFs in vehicle exhaust particles in Japan", *Chemosphere*, 39(1), 143-150
- Monzon, A. and Villanueva, J. (1996), "Impact of the madrid m-40 ring road on emission from road traffic", *Sci. Total. Envir.*, 190(OCT), 119-124
- Morawska, L., Bofinger, N. D., Kocis, L., and Nwankwoala, A. (1998), "Submicrometer and Supermicrometer Particles from Diesel Vehicle Emissions", *Environ. Sci. Technol.*, 32(14), 2033-2042
- Mücke, W. Mücke, W. (1998), "Umwelthygienische Beurteilung von Dieselmotor-Emissionen, zukünftige Entwicklung und Handlungsbedarf", Beiträge zur Toxikologie und Umwelthygiene, 55-69 München, Institut für Toxikologie und Umwelthygiene der Technischen Universität München.
- Muzyka, V. (1998), "On the carcinogenic risk evaluation of diesel exhaust. Benzene in airborne particles and alterations of heme metabolism in lymphocytes as markers of exposure", *Sci. Total. Envir.*, 217(1-2), 103-111
- N.N. (1996), "Speed frequency distribution in air pollutants emissions estimate from road traffic", *Sci. Total. Envir.*, 190(OCT), 181-185
- N.N. (1998), "Research on the effects of aircraft and spacecraft upon the atmosphere", *Atmos. Environ.*, 32(18), 3065
- Negrenti, E. (1996), "Tee - the enea traffic emissions and energetics model micro-scale applications", *Sci. Total. Envir.*, 190(OCT), 167-174
- NOREM (1998), "NOREM, Database for non-regulated emissions from motor vehicles", CD-ROM, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- OECD (1996) "Pollution Prevention and Control – Environmental Criteria for Sustainable Transport", Report on Phase 1 of the Project on Environmentally Sustainable Transport (EST), Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris 1996 (<http://www.oecd.org/env/trans/grphpage/est.htm>)
- Otterstrom, T. (1995), "Pricing of environmental impacts of emissions from road traffic - recent and present research in finland", *Sci. Total. Envir.*, 169(1-3), 311-319
- Pattas, K., Kyriakis, N., and Nakos, C. (1993), "Time dependence of traffic emissions in the urban area of thessaloniki", *Sci. Total. Envir.*, 134(1-3), 273-284

- Peichl, L., Wäber, M., Reifenhäuser, W. (1994), "Schwermetallmonitoring mit der standardisierten Graskultur im Untersuchungsgebiet München - Kfz-Verkehr als Antimonquelle?"; *UWSF - Z Umweltchem Ökotox*, **6**(2), 63-69
- Phalen, R. (1998), "Introduction to the special issue of the second colloquium on particulate air pollution and health", *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, **13**(6), 350-351
- Phalen, R. F. and Lee, J. S. (1998), "Research Needs Relating to Health Effects of Exposure to Low Levels of Airborne Particulate Matter", *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, **13**(6), 352-355
- Pierson, W. R., Gertler, A. W., Robinson, N. F., Sagebiel, J. C., Zielinska, B., Bishop, G. A., Stedman, D. H., Zweidinger, R. B., and Ray, W. D. (1996), "Real-world automotive emission - summary of studies in the Fort McHenry and Tuscarora mountain tunnels", *Atmos. Environ.*, **30**, 2233-2256
- Pierson, W.R. (1994), "On vehicle VOC and NO_x emissions from the standpoint of the tropospheric ozone problem", *Israel Journal of chemistry*, **34**(3-4), 335-340
- Pope, C. A. (1998), "Epidemiology Investigations of the Health Effects of Particulate Air Pollution: Strengths and Limitations", *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, **13**(6), 356-363
- Qin, Y. and Chan, L. Y. (1993), "Traffic source emission and street level air pollution in urban areas of guangzhou, south china (PrC)", *Atmos. Environ.*, **27**(3), 275-282
- Ramamurthy, R. and Clark, N. N. (1999), "Atmospheric Emissions Inventory Data for Heavy-Duty Vehicles", *Envir. Sci. Technol.*, **33**(1), 55-62
- Rappenglück, B. and Fabian, P. (1998), "A Study of BTEX-Ratios in the Urban Area of Munich/Germany Using Rapid Gas Chromatography", *ESPR - Environ. Sci. & Pollut. Res.*, **5**(2), 65-70
- Reilly, P. T. A., Gieray, R. A., Whitten, W. B., and Ramsey, J. M. (1998), "Real-Time Characterization of the Organic Composition and Size of Individual Diesel Engine Smoke Particles", *Environ. Sci. Technol.*, **32**, 2672-2679
- Reinhardt, G., Zemanek, G. (1998) "Zur Ökobilanz von Bioenergieträgern versus fossilen Energieträgern". In: Schmidt, M., Höpfner, U. (Hrsg.), "20 Jahre ifeu-Institut – Engagement für die Umwelt zwischen Wissenschaft und Politik", 1998, Verlag Vieweg, Braunschweig / Wiesbaden
- Reinirkens, P. (1996), "Analysis of emissions through traffic volume in roadside soils and their effects on seepage water", *Sci. Total. Envir.*, **190**(OCT), 361-369
- Reuter, J. E., Allen, B. C., Richards, R. C., Pankow, J. F., Goldman, C. R., Scholl, R. L., and Seyfried, S. (1998), "Concentrations, Sources, and Fate of the Gasoline

Oxygenate Methyl tert-Butyl Ether (MTBE) in a Multiple-Use Lake", *Envir. Sci. Technol.*, **32**(23), 3666-3672

- Rijkeboer, R., Hendriksen, P. (1993), "Regulated and unregulated exhaust gas components from LD vehicles on petrol, diesel, LPG and CNG", TNO-report 93.OR.VM.029/1/PHE/RR, TNO Road Vehicles Research Institute, Delft, Netherlands
- Ristovski, Z. D., Morawska, L., Bofinger, N. D., and Hitchins, J. (1998), "Submicrometer and Supermicrometer Particulate Emission from Spark Ignition Vehicles", *Envir. Sci. Technol.*, **32**(24), 3845-3852
- Rogak, S. N., Green, S. I., and Pott, U. (1998), "Use of tracer gas for direct calibration of emission-factor measurements in a traffic tunnel", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **48**(6), 545-552
- Rogak, S. N., Pott, U., Dann, T., and Wang, D. (1998), "Gaseous emissions from vehicles in a traffic tunnel in Vancouver, British Columbia", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **48**(7), 604-615
- Rogge, W. F., Hildermann, L. M., Mazurek, M. A., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T. (1993), "Sources of fine organic aerosol. 2. Noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks", *Environ. Sci. Technol.*, **27**, 636-651
- Roorda-Knape, M. C., Janssen, N. A. H., De Hartog, J. J., Van Vliet, P. H. N., Harssema, B., and Brunekreef, B. (1998), "Air pollution from traffic in city districts near major motorways", *Atmos. Environ.*, **32**(11), 1921-1930
- Sagebiel, J. C., Zielinska, B., Pierson, W. R., and Gertler, A. W. (1996), "Real-world emissions and calculated reactivities of organic species from motor vehicles", *Atmos. Environ.*, **30**, 2287-2296
- Samaras, Z. and Zierock, K. H. (1994), "Evolution of road traffic emissions in urban areas of the European community", *Sci. Total. Envir.*, **147**(MAY), 253-261
- Samaras, Z., Zafiris, D., Pethainos, D., and Zierock, K. H. (1993), "Forecast of road traffic emissions in the European community up to the year 2000", *Sci. Total. Envir.*, **134**(1-3), 251-262
- Samet, J. M., Zeger, S. L., Kelsall, J. E., and Jing, X. (1998), "Particulate Air Pollution and Mortality: The Particle Epidemiology Evaluation Project", *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, **13**(6), 364-369
- Schäfer, J. (1998), "Uptake of traffic-related heavy metals and platinum group elements (PGE) by plants", *Sci. Total. Envir.*, **215**(1-2), 59-67
- Schauer, J. J., Kleeman, M. J., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T. (1999), "Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 2. C1 through C30 Organic Com-

- pounds from Medium Duty Diesel Trucks", *Environ. Sci. Technol.*, **33**(10), 1578-1587
- Schell, B., Hass, H. (1998) "Reformulierte und alternative Kraftstoffe: Anwendung des Modellsystems EURAD zur Abschätzung möglicher Auswirkungen auf die regionale Luftqualität", Posterbeitrag zum TFS Statusseminar, Dez. 1998, Mainz
- Schlager, H., Konopka, P., Schulte, P., Schumann, U., Ziereis, H., Arnold, F., Klemm, M., Hagen, D. E., Whitefield, P. D., and Ovarlez, J. (1997), "In situ observations of air traffic emission signatures in the North Atlantic flight corridor", *J. Geophys. Res. -Atmos.*, **102**(D9), 10739-10750
- Schläpfer, K., Staehelin, J. and Schläpfer, K. (1994), "Messung von flüchtigen organischen Verbindungen und Schwefeldioxid im Gubristtunnel", Erfassung von Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs mittels Messungen im Gubristtunnel (Projekt im EUROTRAC-Subprojekt Genemis), Zürich, Bern
- Schrenk, D., Fürst, P. (1999), "WHO setzt Werte für die tolerierbare tägliche Aufnahme an Dioxinen neu fest", *Nachr. Chem. Techn. Lab.*, **47**(3), 313-316
- Schuetzle, D., Siegl, W.O., Trescott, E.F., Dearth, M.A., Kaiser, E.W., Gorse, R., Kreucher, W, Kulik, E. (1994), "The Relationship between Gasoline Composition and Vehicle Hydrocarbon Emissions", A Review of Current Studies and Future Research Needs; *Environ Health Perspect*, **102** (Suppl. 4), 3-12
- Schulz, H. (1999), "Volatile organic compounds and particulates as components of diesel engine exhaust gas", *Combustion and Flame*, **118**(1-2), 179-190
- Schumann, U. (1999), "Wie stark beeinflussen die Emissionen des Luftverkehrs Ozon und Klima?", *GAIA*, **8**(1), 19-26
- Schwind, K.-H., Thoma, H., Hutzinger, O., Dawidowsky, N., Weberuss, U., Hagenmaier, H., Bühler, U., Greiner, R., Essers, U., Bessey, E. (1991), "Emission halogenierter Dibenzodioxine (PXDD) und Dibenzofurane (PXDF) aus Verbrennungsmotoren beim Betrieb mit handelsüblichen Betriebsstoffen", *Z. Umweltchem. Ökotox.*, **3**(5), 291-298
- Sellström, U., Jansson, B., Bergman, A., Alsberg, T. (1987), "Selective and Sensitive Analysis of Nitro-PAH", *Chemosphere*, **16**(5), 945-952
- Siegl, W. O., Hammerle, R. H., Herrmann, H. M., Wenclawiak, B., and Luers-Jongen, B. (1999), "Organic emissions profile for a light-duty diesel vehicle", *Atmos. Environ.*, **33**(5), 797-805
- Silva, P. J., Prather, K. A. (1997), "On-line characterization of individual particles from automobile emissions", *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 3074-3080

- Simoneit, B. R. T. (1998), "Biomarker PAH's in the environment", The handbook of environmental chemistry, Berlin, Springer Verlag, 173
- Singer, B. C., Harley, R. A., Littlejohn, D., Ho, J., and Vo, T. (1998), "Scaling of Infrared Remote Sensor Hydrocarbon Measurements for Motor Vehicle Emission Inventory Calculations", *Envir. Sci. Technol.*, **32**(21), 3241-3248
- Sjödin, A. and Lenner, M. (1995), "On-road measurements of single vehicle pollutant emissions, speed and acceleration for large fleets of vehicles in different traffic environments", *Sci. Total. Envir.*, **169**(1-3), 157-165
- Sjödin, A., Cooper, D. A., and Andréasson, K. (1995), "Estimations of real-world N₂O emissions from road vehicles by means of measurements in a traffic tunnel", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **45**(3), 186-190
- Sjödin, A., Sjöberg, K., Svanberg, P. A., and Backstrom, H. (1996), "Verification of expected trends in urban traffic NO_x emissions from long-term measurements of ambient NO₂ concentrations in urban air", *Sci. Total. Envir.*, **190**(OCT), 213-220
- Sjögren, M., Li, H., Rannug, U., Westerholm, R. (1996), "Multivariate Analysis of Exhaust Emissions from Heavy-Duty Diesel Fuels", *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 38-49
- SRU (1994), "Umweltgutachten 1994 - Für eine dauerhaft umweltgerechte Entwicklung", Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU) (1994), *Metzler-Poeschel*, Stuttgart
- Stahelin, J., Friedrich, R., John, C., Keller, C., Stahel, W., and Schläpfer, K. Borrell, P. M., Borrell, P., Kelly, K., Cvitas, T., and Seiler, W. (1997), "Comparison of the Emission Factors of Road Traffic from the Gubrist Tunnel Study with the IER Model", Volume 2: Emissions, Deposition, Laboratory Work and Instrumentation (Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere), 59-62 Southampton, Computational Mechanics Publications. Proceedings of EUROTRAC Symposium '96. 3-25-1996.
- Stahelin, J., Keller, C., Stahel, W., and Schläpfer, K. Borrell, P. M., Borrell, P., Kelly, K., Cvitas, T., and Seiler, W. (1997), "Emission Factors for Road Traffic from the Gubrist Tunnel Study", Volume 2: Emissions, Deposition, Laboratory Work and Instrumentation (Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere), 63-67 Southampton, Computational Mechanics Publications. Proceedings of EUROTRAC Symposium '96. 3-25-96.
- Stahelin, J., Keller, C., Stahel, W., Schläpfer, K., and Wunderli, S. (1998), "Emission factors from road traffic from a tunnel study (Gubrist tunnel, Switzerland). Part III: results of organic compounds, SO₂ and speciation of organic exhaust emission", *Atmos. Environ.*, **32**(6), 999-1009

- Staehelin, J., Keller, C., Stahel, W., Schläpfer, K., Steinemann, U., Bürgin, T., and Schneider, S. (1997), "Modelling emission factors of road traffic from a tunnel study", *Environmetrics*, **8**, 219-239
- Staehelin, J., Schläpfer, K., Bürgin, T., Steinemann, U., Schneider, S., Brunner, D., Bäumle, M., Meier, M., Zahner, C., Keiser, S., Stahel, W., and Keller, C. (1995), "Emission factors from road traffic from a tunnel study (Gubrist tunnel, Switzerland). Part I: concept and first results", *Sci. Total. Envir.*, **169**(1-3), 141-147
- Statistische Berichte Baden-Württemberg (1996), "Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC-Emissionen) in Baden-Württemberg 1992 - Kreisergebnisse", Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Q IV 2 - j/92 (5), Artikel-Nr. 3624 92005
- Statistische Berichte Baden-Württemberg (1997a), "Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC-Emissionen) in Baden-Württemberg 1994 - Kreisergebnisse; Statistisches Landesamt Baden-Württemberg", Q IV 2 - j/94 (2), Artikel-Nr. 3624 94002
- Statistische Berichte Baden-Württemberg (1997b), "Emissionen von Schwefeldioxid, Stickoxid, Kohlenmonoxid und Staub in Baden-Württemberg 1994 - Landesergebnisse", Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Q IV 2 - j/94 (3), Artikel-Nr. 3624 94003
- Stedman, D. H., Bishop, G. A. (1997), "On-Road Evaluation of an Automobile Emission Test Program", *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 927-931
- Steubing, L. and Vogel, A. (1998), "Biomonitoring von Immissionswirkungen durch verkehrsbedingte Schwermetalle in einem Heideökosystem", *UWSF - Z Umweltchem. Ökotox.*, **10**(6), 333-338
- Sturm, P. J., Almbauer, R., Sudy, C., and Pucher, K. (1997), "Application of computational methods for the determination of traffic emissions", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **47**(11), 1204-1210
- Sturm, P. J., Pucher, K., Sudy, C., and Almbauer, R. A. (1996), "Determination of traffic emissions - intercomparison of different calculation methods", *Sci. Total. Envir.*, **190**(OCT), 187-196
- Tahir, S. F. and Koh, C. A. (1999), "Catalytic destruction of volatile organic compound emissions by platinum based catalyst", *Chemosphere*, **38**(9), 2109-2116
- Taylor, P. (1998), "Benzene Formation from the Flow Reactor Oxidation of MTBE", *Combust. Flame*, **115** (1-2), 262-266
- Tejada, S. B., Black, F., and Kleindienst, T. (1998), "Preparation of automobile organic emission surrogates for photochemical model validation", *Atmos. Environ.*, **32**(14-15), 2443-2451

- Teufel, D., Bauer, P., Voigt, S., Wagner, T. (1998), "Krebsrisiko durch Benzol und Dieselrußpartikel", Bericht Nr. 44 des Umwelt- und Prognose-Instituts, Heidelberg, Okt. 1997, 3. Aufl. Juli 1998
- Touaty, M., Bonsang, B. (2000), „Hydrocarbon emissions in a highway tunnel in the Paris area“, *Atmospheric Environment*, **34**, 985-996.
- Tremp, J., Mattrell, P., Fingler, S., Giger (1993), "Phenols and nitrophenols as tropospheric pollutants: emissions from automobile exhausts and phase transfer in the atmosphere", *Water, Air and Soil Pollution*, **68**, 113-123
- UBA (1996), "Berechnungen der direkten Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland im Zeitraum 1995 bis 2010" Texte Nr. 73/96, Umweltbundesamt, Berlin
- UBA (1997a), "Daten zur Umwelt - Der Zustand der Umwelt in Deutschland", Ausgabe 1997; Umweltbundesamt (1997), Erich Schmidt Verlag, Berlin
- UBA (1997b), "Nachhaltiges Deutschland - Wege zu einer dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung", Umweltbundesamt (Hrsg.), Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1997
- UBA (1999): "Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen" Texte Nr. 33/99, Umweltbundesamt, Berlin
- UBA / TNO (1997): Berdowski, J.J.M., Baas, J., Bloos, J.J., Visschedijk, A.J.H., Zandveld, P.Y.J. (1997), "The European Atmospheric Emission Inventory of Heavy Metals and Persistent Organic Pollutants for 1990", Umweltbundesamt, Juni 1997; CD-ROM; Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Luftreinhalte, Forschungsbericht 104 02 672/03; TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation
- UM (1993), "Konzeption zur Minderung der VOC-Emissionen in Baden-Württemberg", Bericht der VOC-Landeskommission, Heft 21, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (1993), Stuttgart
- UMEG (1999), "Rußbericht 1998 – Rußmessprogramm Baden-Württemberg, Abschlussbericht", UMEG Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen mbH, Karlsruhe, 1999 (im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr in Baden-Württemberg)
- Vaccaro, R. and Nicolo, L. (1995), "Air pollutants emissions estimate from maritime traffic in the italian harbours of venice and piombino", *Sci. Total. Envir.*, **169**(1-3), 257-263
- Vanderstraeten, P. F., Wauters, E. L., and Verduyn, G. E. (1991), "Tunnel air quality - the carbon balance as an alternative to evaluate traffic emissions", *Staub. Rein.*, **51**(3), 83-90

- Vester, F. (1992), "Ausfahrt Zukunft – Strategien für den Verkehr von morgen. Eine Systemuntersuchung", Heyne, München 1992
- Victorin, K., Stahlberg, M., Alsberg, T., Strandell, M., Westerholm, R., Egebäck, K.-E. (1988), "Emission of Mutagenic, Irritating and Odorous Substances from Gasoline fueled Vehicles with Different Emission Control Systems", *Chemosphere*, **17**(9), 1767-1780
- VW AG (1988), "Nicht limitierte Automobil-Abgaskomponenten", Wolfburg.
- Wäber, M., Laschka, D., Peichl, L. (1996), Biomonitoring verkehrsbedingter Platin-Immissionen, *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.*, **8**(1), 3-7
- Wäber, M., Dietl, C., Köhler, J., and Peichl, L. (1998), "Bioakkumulation und Deposition von Antimon, Blei und polyzyklischen Kohlenwasserstoff-Immissionen", *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.*, **10**(5), 276-280
- Wagner, T., Wyszynski, M. L. (1996), "Aldehydes and ketones in engine exhaust emissions – a review", *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, **210**, 109-122
- Wallington, T.J. (1998), "Atmospheric Chemistry of Selected Automotive Fuels and Fuel Additives", *ESPR - Environ. Sci. & Pollut. Res.*, **5**(3), 120-121
- Watts, S. and Roberts, C. N. (1998), "New directions: hydrogen sulfide from car catalytic converters", *Atmos. Environ.*, **33**(1), 169-170
- Weisweiler, W., Stieger, D. (1999), "Verfahrenstechnische Optimierung eines Ammoniak-Generators zur Bereitstellung von NH₃ für die katalysierte Stickoxid-Minderung in Diesel-Motorabgasen", Beitrag zum BWPLUS-Statusseminar, 9. März 1999, Forschungszentrum Karlsruhe
- Westerholm, R., Christensen, A. and Rosen, A. (1996), "Regulated and unregulated exhaust emissions from two three-way catalyst equipped gasoline fuelled vehicles", *Atmos. Environ.*, **30**(20), 3529-3536
- Westerholm, R., Li, H., Almên, J. (1993), "Estimation of aliphatic amine emissions in automobile exhausts", *Chemosphere*, **27**(8), 1381-1384
- Wiesmann, F. J., Halbritter, G., and Kupsch, C. (1991), "[Ozone build-up by anthropogenic nitrogen oxide-emission and hydrocarbon-emission - importance of the motor traffic emissions]", *Staub. Rein.*, **51**(2), 35-41
- Winther, M. (1998), "Petrol passenger car emissions calculated with different emission models", *Sci. Total. Envir.*, **224**(1-3), 149-160
- Yang, H. H. (1998), "PAH emissions influenced by Mn-based additive and turbo-charging from a heavy-duty diesel engine", *Environ. Int.*, **24**(4), 389-403

- Yanowitz, J., Graboski, M. S., Ryan, L. B. A., Alleman, T. L., and McCormick, R. L. (1999), "Chassis Dynamometer Study of Emissions from 21 In-Use Heavy-Duty Diesel Vehicles", *Envir. Sci. Technol.*, **33**(2), 209-216
- Ye, Y., Galbally, I. E., Weeks, I. A., Duffy, B. L., and Nelson, P. F. (1998), "Evaporative emissions of 1,3-butadiene from petrol-fuelled motor vehicles", *Atmos. Environ.*, **32**(14-15), 2685-2692
- Zachariadis, T. and Samaras, Z. (1997), "Comparative assessment of European tools to estimate traffic emissions", *Int. J. Veh. Des.*, **18**(3-4), 312-325
- Zereini, F., Alt, F., Rankenburg, K., Beyer, J.-M., Artelt, S. (1997), "Verteilung von Platingruppenelementen (PGE) in den Umweltkompartimenten Boden, Schlamm, Straßenstaub, Straßenkehrgut und Wasser: Emission von Platingruppenelementen (PGE) aus Kfz-Abgaskatalysatoren", *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.*, **9**(4), 193-200
- Zereini, F., Zientek, C., Urban, H., (1993), "Konzentration von Platingruppenelementen (PGE) in Böden - Platinmetall-Emission durch Abrieb des Abgaskatalysatormaterials", *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.*, **5**(3), 130-134
- Zereini, F., Dirksen, F., Skerstupp, B., and Urban, H. (1998), "Sources of Anthropogenic Platinum-Group Elements (PGE): Automotive Catalysts versus PGE-Processing Industries", *ESPR - Environ. Sci. & Pollut. Res.*, **5**(4), 223-230
- Zereini, F., Skerstupp, B., Alt, F., Helmers, E., and Urban, H. (1997), "Geochemical behaviour of platinum-group elements (PGE) in particulate emissions by automobile exhaust catalysts: experimental results and environmental investigations", *Sci. Total. Envir.*, **206**(2-3), 137-146
- Zielinska, B., Sagebiel, J. C., Harsfield, G., Gertler, A. W., and Pierson, W. R. (1996), "Volatile organic compounds up to C20 emitted from motor vehicles - measurement methods", *Atmos. Environ.*, **30**, 2269-2286

7 Anhang

7.1 Begriffsdefinitionen

<i>Verkehr</i>	Räumliche Beförderung von Personen oder Gütern. Einteilung in Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr.
<i>Emissionen</i>	In dieser Arbeit werden darunter alle Stoffe verstanden, die von Verkehrsfahrzeugen direkt an die Umwelt, in erster Linie an die Umgebungsluft, abgegeben werden oder die indirekt durch die Bereitstellung von Mobilität entstehen.
<i>Hauptemissionen</i>	Stoffe, die in Baden-Württemberg pro Jahr in einer Größenordnung von Kilotonnen bis Megatonnen (10^3 - 10^6 t/a) emittiert werden bzw. Stoffe, die von Straßenfahrzeugen in einer Größenordnung von Milligramm bis Gramm pro Kilometer (10^{-3} -1 g/km) abgegeben werden.
<i>Nebenemissionen</i>	Stoffe, die in Baden-Württemberg pro Jahr in einer Größenordnung von Gramm bis Tonnen (10^3 - 10^6 t/a) emittiert werden bzw. Stoffe, die von Straßenfahrzeugen in einer Größenordnung von Picogramm bis Mikrogramm pro Kilometer (10^{-12} - 10^{-6} g/km) abgegeben werden.

7.2 Verwendete Abkürzungen

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ADI	Acceptable daily intake, Menge einer chemischen Substanz, die von einem Menschen täglich ohne Schaden für die Gesundheit ein Leben lang aufgenommen werden kann
BaP	Benzo[a]pyren
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
EPA / US-EPA	Environmental Protection Agency (Nationale Umweltschutzbehörde in den USA)
EU	Europäische Union
IARC	International Agency for Research on Cancer
Kfz	Kraftfahrzeug
LAI	Länderausschuss für Immissionsschutz
LOAEL	Lowest Observed Adverse Effect Level. Dieser Wert beschreibt die kleinste Menge einer Substanz, mit der in vivo oder in vitro an biologischen Objekten eine nachteilige Wirkung zu erzielen ist.
MAK	maximale Arbeitsplatz-Konzentration
NMVO	leichtflüchtige organische Verbindungen ohne Methan
NOAEL	no-observed adverse effect level. Der Wert gibt die Dosis an, bei der unter den gewählten experimentellen Bedingungen keine toxische Wirkung mehr nachgewiesen werden kann.
NO _x	Stickstoffoxide
OW	Orientierungswert
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PASK	schwefelhaltige polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD (Cl _x DD)	polychlorierte Dibenzop-dioxine
PCDF (Cl _x DF)	polychlorierte Dibenzofurane
PIC	Produkte unvollständiger Verbrennung

PM10	Schwebstaubanteil mit den Partikeln, die einen Durchmesser von 10 Mikrometern oder weniger haben
PXDD	polyhalogenierte Dibenzo-p-dioxine
PXDF	polyhalogenierte Dibenzofurane
SO ₂	Schwefeldioxid
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TCDD	2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin
TDI	tolerable daily intake, tolerierbare tägliche Aufnahme
TEF	Toxizitätsäquivalentfaktor
TEQ	Toxizitätsäquivalente
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	flüchtige organische Verbindungen
WHO	World Health Organization

Einheiten:

t	Tonne = 1.000.000 g (= 10 ⁶ g)
kg	Kilogramm = 1.000 g (= 10 ³ g)
g	Gramm = 1 g (= 10 ⁰ g)
mg	Milligramm = 0,001 g (= 10 ⁻³ g)
µg	Mikrogramm = 0,000001 (= 10 ⁻⁶ g)
ng	Nanogramm = 0,000000001 g (= 10 ⁻⁹ g)
pg	Pikogramm = 0,000000000001 g (= 10 ⁻¹² g)
fg	Femtogramm = 0,000000000000001 g (10 ⁻¹⁵ g)
ppm	= 1:10 ⁶ = mg/kg = µg/g
ppb	= 1:10 ⁹ = µg/kg = ng/g
ppt	= 1:10 ¹² = ng/kg = pg/g

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Kennzahlen für den Verkehr in Baden-Württemberg [Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/kennzbw/kennzbw.htm]	2
Tabelle 1-2: Verkehrskennzahlen im internationalen Vergleich [Quelle: Umweltbundesamt, http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/kraftfahrzeuge-fahrleistung.htm]	3
Tabelle 1-3: Verkehrsbedingte Emissionen in Baden-Württemberg im Jahr 1994 [LfU 1996].....	8
Tabelle 1-4: NMVOC-Emissionen des Verkehrs in Baden-Württemberg (Einheit: 1000 t)	13
Tabelle 1-5: Typische VOC-Emissionsprofile eines Motors und einer Kfz-Flotte.....	15
Tabelle 1-6: POCP-Werte für VOC-Substanzen oder Substanzgruppen [LfU 1996] (*: per Definition)	29
Tabelle 2-1: Emissionen organischer Stoffgruppen von Straßenkraftfahrzeugen (summierte Emissionsfaktoren in mg/km)	33
Tabelle 3-1: Strukturformeln von Methan und Ethan	42
Tabelle 3-2: Emissionen an Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km)	43
Tabelle 3-3: Emissionen an azyklischen, gesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 1	44
Tabelle 3-4: Strukturformeln einiger ungesättigter Kohlenwasserstoffe.....	52
Tabelle 3-5: Emissionen an azyklischen, ungesättigten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 1	53
Tabelle 3-6: Strukturformeln einiger zyklischer Kohlenwasserstoffe.....	57
Tabelle 3-7: Emissionen an zyklischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 1	58
Tabelle 3-8: Emissionen an monozyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in µg/km), Teil 1	63
Tabelle 3-9: Emissionen an Biphenyl und alkylierten Biphenylen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km).....	67
Tabelle 3-10: Einstufungen, Grenz- und Orientierungswerte für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, die in die U.S. EPA-Liste aufgenommen wurden.....	69
Tabelle 3-11: Strukturformeln einiger polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe.....	70
Tabelle 3-12: Emissionen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in µg/km), Teil 1	72
Tabelle 3-13: Emissionen an alkylierten PAK von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 1	77
Tabelle 3-14: Emissionen an sonstigen aromatischen Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km)	85
Tabelle 3-15: Emissionen an Alkoholen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km).....	86
Tabelle 3-16: Emissionen an Phenolen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km) ..	87
Tabelle 3-17: Strukturformeln von Formaldehyd, Acetaldehyd und Crotonaldehyd.....	90
Tabelle 3-18: Emissionen an azyklischen Aldehyden von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 1	91
Tabelle 3-19: Emissionen an azyklischen Ketonen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km).....	93
Tabelle 3-20: Strukturformeln von Benzaldehyd und p-Tolylaldehyd.....	94
Tabelle 3-21: Emissionen an aromatischen Aldehyden von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in µg/km), Teil 1	95

Tabelle 3-22: Strukturformeln einiger aromatischer Ketone	98
Tabelle 3-23: Emissionen an aromatischen Ketonen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1	99
Tabelle 3-24: Emissionen an Carbonsäuren von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1: azyklische Carbonsäuren	104
Tabelle 3-25: Emissionen an sauerstoffhaltigen Heterozyklen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$)	107
Tabelle 3-26: Emissionen an aliphatischen Aminen von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben)	108
Tabelle 3-27: Emissionen an stickstoffhaltigen Heterozyklen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$)	109
Tabelle 3-28: Emissionen an sonstigen stickstoffhaltigen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$)	110
Tabelle 3-29: Strukturformel von 3-Nitrobenzanthron	111
Tabelle 3-30: Einstufung der Kanzerogenität einiger Nitro-PAK gemäß [IARC 1989]	112
Tabelle 3-31: Emissionen an aromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren wie angeg.), Teil 1	113
Tabelle 3-32: Emissionen an oxidierten aromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben), Teil 1	119
Tabelle 3-33: Emissionen an heteroaromatischen Nitroverbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben)	121
Tabelle 3-34: Emissionen an schwefelhaltigen heterozyklischen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1	123
Tabelle 3-35: Emissionen an schwefelhaltigen heterozyklischen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben), Teil 2	124
Tabelle 3-36: Emissionen an nitrierten PASK von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$) 125	
Tabelle 3-37: Strukturformeln der polychlorierten Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF)	126
Tabelle 3-38: Toxizitätsäquivalentfaktoren (WHO-TEF) für PCDD und PCDF (1997 festgelegt anlässlich eines Expertentreffens der WHO in Stockholm) [Schrenk & Fürst 1999] ..	127
Tabelle 3-39: Emissionsfaktoren (EF) für PCDD-/PCDF-Emissionen verschiedener Fahrzeugklassen (alle Angaben in $\text{pg TEQ} / \text{km}$)	128
Tabelle 3-40: Emissionen an halogenierten Kohlenwasserstoffen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in $\mu\text{g}/\text{km}$)	129
Tabelle 3-41: Emissionen an halogenierten PAK von Straßenkraftfahrzeugen (nur qualitative Angaben)	129
Tabelle 3-42: Emissionen an PXDD von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in pg/km), Teil 1: PCDD	130
Tabelle 3-43: Emissionen an PXDF von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in pg/km), Teil 1: PCDF	132
Tabelle 3-44: Emissionen an toxischen Äquivalenten von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in pg/km)	135
Tabelle 3-45: Emissionen anorganischer Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km)	136
Tabelle 3-46: Emissionen an gasförmigen anorganischen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km), Teil 1	138
Tabelle 3-47: Emissionen an sonstigen anorganischen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km), Teil 1	140
Tabelle 3-48: Emissionen an sonstigen anorganischen Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km), Teil 2	141

Tabelle 3-49: Emissionen an Metallen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in $\mu\text{g}/\text{km}$), Teil 1	144
Tabelle 5-1: Im vorliegenden Arbeitsbericht untersuchte Stoffklassen und wichtigste Ergebnisse	165

7.4 Abbildungsverzeichnis

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].....	2
Abbildung 1-2:	Verursacher von Luftschadstoffemissionen in Baden-Württemberg 1994 [LfU 1996]	6
Abbildung 1-3:	Anteile der Verursacher an den Gesamtemissionen wichtiger Luftschadstoffe in Baden-Württemberg für das Jahr 1994 (Ammoniak 1991) [LfU 1996].....	7
Abbildung 1-4:	Anteile des Verkehrs an verbrennungsbedingten Gesamtemissionen in Baden-Württemberg 1994 [Krüger et al. 1998].....	8
Abbildung 1-5:	Anteile einzelner VOC-Substanzen oder Substanzgruppen an den VOC-Emissionen des Straßenverkehrs [LfU 1996].....	14
Abbildung 1-6:	Massenbilanzierung der extrahierbaren organischen Verbindungen in Feinpartikelemissionen von a) Automobilen ohne Abgaskatalysator, b) Katalysatorautos und c) Lastkraftwagen [Rogge et al. 1993].....	16
Abbildung 1-7:	Massenbilanzierung der gasförmigen, mittelflüchtigen und partikel-gebundenen organischen Verbindungen in Diesel-Lkw-Abgasen [Schauer et al. 1999].....	18
Abbildung 1-8:	Abgasgrenzwerte für die Serienproduktion von Pkw: Kohlenmonoxid [Quelle: Umweltbundesamt Jahresbericht 1996] (korrigierte Werte entspr. dem Wegfall der 40 s Leerlauf zu Beginn des Zyklus)	19
Abbildung 1-9:	Abgasgrenzwerte für die Serienproduktion von Pkw: Kohlenwasserstoffe und Partikel [Quelle: Umweltbundesamt Jahresbericht 1996] (korrigierte Werte entspr. dem Wegfall der 40 s Leerlauf zu Beginn des Zyklus).....	20
Abbildung 1-10:	Abgasgrenzwerte für die Serienproduktion von Pkw: Kohlenwasserstoffe + Stickstoffoxide [Quelle: Umweltbundesamt Jahresbericht 1996] (korrigierte Werte entspr. dem Wegfall der 40 s Leerlauf zu Beginn des Zyklus).....	20
Abbildung 1-11:	Abgasgrenzwerte für die Serienproduktion von Pkw: Kohlenwasserstoffe und Partikel [Quelle: Umweltbundesamt Jahresbericht 1996] (korrigierte Werte entspr. dem Wegfall der 40 s Leerlauf zu Beginn des Zyklus).....	21
Abbildung 1-12:	Verlauf der Fahrleistungen im Straßenverkehr in Deutschland von 1980 bis 2020, berechnet mit TREMOD [Einheit: Mrd km].....	23
Abbildung 1-13:	Verlauf der direkten Emissionen an Kohlendioxid im Straßenverkehr in Deutschland von 1980 bis 2020, berechnet mit TREMOD [Einheit: Mio t/a]	23
Abbildung 1-14:	Verlauf der direkten Emissionen an Stickstoffoxiden im Straßenverkehr in Deutschland von 1980 bis 2020, berechnet mit TREMOD [Einheit: kt/a].....	24
Abbildung 1-15:	Verlauf der direkten Emissionen an Dieselrußpartikeln im Straßenverkehr in Deutschland von 1980 bis 2020, berechnet mit TREMOD [Einheit: kt/a].....	24
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]	25
Abbildung 1-17:	Verlauf der direkten Emissionen an Benzol im Straßenverkehr in Deutschland von 1980 bis 2020, berechnet mit TREMOD [Einheit: kt/a]	25
Abbildung 1-18:	Photochemische Bildung von Ozon [aus Lenz et al. 1993].....	28
Abbildung 1-19:	Atmosphärische Prozesse der Säurebildung aus NO _x [aus Lenz et al. 1993]	31
Abbildung 2-1:	Durchschnittliche Gesamtemissionen an Kohlenwasserstoffen und oxidierten Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfakt. in mg/km)	34

Abbildung 2-2:	Durchschnittliche Emissionen an organischen Verbindungsklassen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km).....	35
Abbildung 2-3:	Durchschnittliche Emissionen an organischen Verbindungsklassen von Straßenkraftfahrzeugen (normiert auf die Emissionsfaktoren von Pkw ohne G-Kat)	36
Abbildung 2-4:	Durchschnittliche Zusammensetzung der organischen Emissionen von Pkw mit geregelter Abgaskatalysator.....	37
Abbildung 2-5:	Durchschnittliche Zusammensetzung der organischen Emissionen von Pkw ohne geregelter Abgaskatalysator.....	37
Abbildung 2-6:	Durchschnittliche Zusammensetzung der organischen Emissionen von Pkw mit Dieselmotor	38
Abbildung 2-7:	Durchschnittliche Zusammensetzung der organischen Emissionen von Lkw (mit Dieselmotor).....	38
Abbildung 3-1:	Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter gesättigter Kohlenwasserstoffe von Straßenkraftfahrzeugen [mg/km]	41
Abbildung 3-2:	Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter ungesättigter Kohlenwasserstoffe von Straßenkraftfahrzeugen [mg/km]	51
Abbildung 3-3:	Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter monozyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe von Straßenkraftfahrzeugen [mg/km]	61
Abbildung 3-4:	Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe von Straßenkraftfahrzeugen [μ g/km]	71
Abbildung 3-5:	Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter azyklischer Aldehyde von Straßenkraftfahrzeugen [μ g/km].....	88
Abbildung 3-6:	Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter aromatischer Aldehyde von Straßenkraftfahrzeugen [μ g/km].....	94
Abbildung 3-7:	Durchschnittliche Emissionsfaktoren ausgewählter aromatischer Aldehyde von Straßenkraftfahrzeugen [μ g/km].....	97
Abbildung 3-8:	Emissionsfaktoren ausgewählter Carbonsäuren von Straßenkraftfahrzeugen (Größenordnungen, Einheit [μ g/km])	102
Abbildung 3-9:	Durchschnittliche Emissionen anorganischer Verbindungen von Straßenkraftfahrzeugen (Emissionsfaktoren in mg/km).....	137
Abbildung 4-1:	Auf höchste Energieeffizienz optimierte Komponenten eines Hypercars [aus http://www.hypercar.com].....	159

