

## Abfallverbrennung als Emissionsquelle

Der Beitrag der thermischen Abfallbehandlung zur gesamten Schadstoffemission in Deutschland ist gering

Von Margit Löschau

Die Luftqualität wird durch die Emissionen aus verschiedensten Emissionsquellen nachteilig verändert. Neben der Energiewirtschaft und sonstigen Industrieanlagen tragen auch der Verkehr sowie Haushalte und Kleinverbraucher für viele Schadstoffe einen erheblichen Anteil an der Gesamtemission. Die thermische Abfallbehandlung macht in ihrer Gesamtheit nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamtschadstofffracht aus. Regional kann die Luftbelastung durch eine solche Anlage jedoch durchaus von Bedeutung sein, insbesondere wenn es durch eine Störung kurzzeitig zu einem Schadstoffausstoß deutlich oberhalb der geltenden Grenzwerte kommt. Im bestimmungsgemäßen Betrieb und somit bei Einhaltung der strengen Grenzwerte der 17. BImSchV, die für Abfall die niedrigsten Grenzwerte im Vergleich zu anderen Brennstoffen festlegt, ist die thermische Abfallbehandlung jedoch kein Ansatzpunkt für weitgreifende Einsparungspotentiale an Schadstoffen.

### 1 Luftqualität und natürliche Luftzusammensetzung

Die Luftqualität gibt Auskunft über den Anteil an Luftverunreinigungen im Vergleich zur natürlichen Luftzusammensetzung. Die Qualität der Luft wird über die Festlegung von Grenz- und Richtwerten für luftverunreinigende Substanzen aus den verschiedensten Emissionsquellen bestimmt. Für die Betrachtung von Emissionen aus der thermischen Abfallbehandlung sind insbesondere die in der Siebzehnten Bundes-Immissionsschutzverordnung (17. BImSchV) begrenzten Stoffe und Stoffgruppen von Interesse (Tabelle 1). Schadstoffe, die bei der Verbrennung von Abfällen über den Luftpfad ausgetragen werden, müssen entsprechend den hier festgelegten Grenzwerten durch ein effizientes Abgasreinigungssystem reduziert werden. Die natürliche Zusammensetzung der Luft ist in Tabelle 2 zusammengestellt. Die beiden größten Hauptbestandteile sind mit etwa 78

Parameter		Tagesmittelwert	Halbstundenmittelwert	Jahresmittelwert für Anlagen > 50 MW
mg/Nm <sup>3</sup> trocken (11 Vol.-% O <sub>2</sub> tr.)				
Gesamtstaub		10	30	k. A.
Organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff	C <sub>org</sub>	10	20	k. A.
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorwasserstoff	HCl	10	60	k. A.
Gasförmige anorganische Fluorverbindungen, angegeben als Fluorwasserstoff	HF	1	4	k. A.
Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid, angegeben als Schwefeldioxid	SO <sub>x</sub>	50	200	k. A.
Quecksilber und seine Verbindungen, angegeben als Quecksilber	Hg	0,03	0,05	k. A.
Kohlenmonoxid	CO	50	100	k. A.
Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, angegeben als Stickstoffdioxid	NO <sub>x</sub>	200	400	100
Über die jeweilige Probezeit gebildete Mittelwerte				
Cadmium und seine Verbindungen, angegeben als Cd, Thallium und seine Verbindungen, angegeben als Tl			0,05	
Antimon und seine Verbindungen, angegeben als Sb, Arsen und seine Verbindungen, angegeben als As, Blei und seine Verbindungen, angegeben als Pb, Chrom und seine Verbindungen, angegeben als Cr, Cobalt und seine Verbindungen, angegeben als Co, Kupfer und seine Verbindungen, angegeben als Cu, Mangan und seine Verbindungen, angegeben als Mn, Nickel und seine Verbindungen, angegeben als Ni, Vanadium und seine Verbindungen, angegeben als V, Zinn und seine Verbindungen, angegeben als Sn			0,5	
Arsen und seine Verbindungen (außer Arsenwasserstoff), angegeben als As Benzo(a)pyren Cadmium und seine Verbindungen, angegeben als Cd, wasserlösliche Cobaltverbindungen, angegeben als Co, Chrom(VI)verbindungen (außer Bariumchromat und Bleichromat), angegeben als Cr <b>oder</b> Arsen und seine Verbindungen, angegeben als As Benzo(a)pyren Cadmium und seine Verbindungen, angegeben als Cd, Cobalt und seine Verbindungen, angegeben als Co, Chrom und seine Verbindungen, angegeben als Cr			0,05	
ng I-TEQ/Nm <sup>3</sup> trocken (11 Vol.-% O <sub>2</sub> tr.)				
Dioxine und Furane (PCDD/PCDF)			0,1	

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte für die thermische Abfallbehandlung nach der 17. BImSchV

Bestandteil	Formel	Volumenanteil	Massenanteil
<b>Hauptbestandteile</b>			
	%		
Stickstoff	N <sub>2</sub>	78,084	75,518
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	20,942	23,135
Argon	Ar	0,934	1,288
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	0,038	0,058
<b>Zwischensumme</b>		<b>99,998</b>	<b>99,999</b>
<b>Spurengase</b>			
			ppm
Neon	Ne	18,180	12,67
Helium	He	5,240	0,72
Methan	CH <sub>4</sub>	1,760	0,97
Krypton	Kr	1,140	3,30
			ppb
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	500	36
Distickstoffoxid	N <sub>2</sub> O	317	480
Kohlenstoffmonoxid	CO	50–200	50–200
Xenon	Xe	87	400
			ppt
Dichlordifluormethan (CFC-12)	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	535	2200
Trichlorfluormethan (CFC-11)	CCl <sub>3</sub> F	226	1100
Chlordifluormethan (HCFC-22)	CHClF <sub>2</sub>	160	480
Tetrachlorkohlenstoff	CCl <sub>4</sub>	96	510
Trichlortrifluorethan (CFC-113)	C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	80	520
Methylchloroform	CH <sub>3</sub> -CCl <sub>3</sub>	25	115
1,1-Dichlor-1-Fluorethan (HCFC-141b)	CCl <sub>2</sub> F-CH <sub>3</sub>	17	70
1-Chlor-1,1-difluorethan (HCFC-142b)	CClF <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	14	50
Schwefelhexafluorid	SF <sub>6</sub>	5	25
Bromchlordifluormethan	CBrClF <sub>2</sub>	4	25
Bromtrifluormethan	CBrF <sub>3</sub>	2,5	13

Tabelle 2: Natürliche Zusammensetzung der trockenen Luft bei Normalnull

Volumenprozent Stickstoff (N<sub>2</sub>) und mit etwa 21 Volumenprozent Sauerstoff (O<sub>2</sub>). Weiterhin sind Argon (Ar), Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) sowie eine Vielzahl von Spurengasen enthalten.

## 2 Emissionen aus der thermischen Abfallbehandlung

Für die Abschätzung der Emissionen aus der thermischen Abfallbehandlung wurden die

veröffentlichten Emissionswerte der in Betrieb befindlichen Anlagen ausgewertet. In Tabelle 3 sind die nach Durchsatz gewichteten Jahresmittelwerte an Schadgasen aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen für die kontinuierlich zu messenden Schadstoffe und die Mittelwerte der Maximalwerte für die diskontinuierlich zu messenden Schadstoffe nach der 17. BImSchV sowie einige statistische Kenngrößen zusammengestellt. Daraus wird ersichtlich, dass im Mittel bereits jetzt alle Grenzwerte der 17. BImSchV

weit unterschritten werden. Nur Stickoxide liegen mit durchschnittlich 101 Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm<sup>3</sup>) trocken bei einem Grenzwert von 200 mg/Nm<sup>3</sup> leicht oberhalb von 50 Prozent des Grenzwerts. Bei den sauren Schadgasen werden nur 10 bis 20 Prozent der nach 17. BImSchV erlaubten Emissionskonzentration emittiert. Für Staub, Schwermetalle sowie Dioxine und Furane liegen die realen Emissionskonzentrationen sogar unter 10 Prozent des Grenzwerts (vergleiche Abb. 1). Die dargestellten Werte für die diskontinuierlich gemessenen Emissionen sind konservativ, da stets die Maximalwerte betrachtet wurden und in Fällen, in denen die Emissionen zu niedrig zum Messen waren, die Nachweisgrenze als Emissionswert verwendet wurde.

In Genehmigungsverfahren kritisieren Einwander häufig, dass bei Neuanlagen zunehmend – vermeintlich leistungsschwächere – quasitrockene und konditioniert trockene Abgasreinigungsverfahren zum Einsatz kommen. Abb. 2 zeigt, dass diese Behauptung unzutreffend ist und die quasitrockenen und konditioniert trockenen Abgasreinigungsverfahren auf einem nahezu gleich hohen Leistungsniveau arbeiten wie die Nassverfahren. Einzige Ausnahme stellt die Abscheidung von Chlorwasserstoff dar, das in der nassen Phase im Durchschnitt auf etwa 0,67 mg/Nm<sup>3</sup>, also unter sieben Prozent des Grenzwertes, abgeschieden wurde und damit deutlich weiter als in der quasitrockenen oder trockenen Phase, mit der im Durchschnitt nur etwa 49 Prozent des Grenzwerts erreichbar waren.

Die Abscheideleistung für Staub und staubgebundene Schwermetalle ist in erster Linie an die Leistungsfähigkeit des Filters gekoppelt und kann durch die Verfahrensauswahl nass, quasitrocken und trocken kaum beeinflusst werden. Aber auch bei Quecksilber, das zum Großteil dampfförmig vorliegt, wird ersichtlich, dass eine Abscheidung auf der Basis von Aktivkoks und Gewebefilter

	Einheit	CO	C <sub>org.</sub>	HCl	HF	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Staub	Hg	Cd + Tl	Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V + Sn	B(a)P + As + Cd + Co + Cr	PCDD/F
Anzahl ausgewerteter Anlage	n	50	50	50	43	50	50	50	50	46	46	20	50
Grenzwert	mg/Nm <sup>3</sup> PCDD/F: ng/Nm <sup>3</sup>	50	10	10	1	50	200	10	0,03	0,05	0,5	0,05	0,1
Gewichteter Jahresmittelwert	mg/Nm <sup>3</sup> PCDD/F: ng/Nm <sup>3</sup>	11,7	0,74	2,0	0,13	6,2	101,2	0,60	0,0024	0,0031	0,035	0,0047	0,0050
Anteil am Grenzwert	%	23,4	7,4	20,0	12,5	12,4	50,6	6,0	7,9	6,2	6,9	9,4	5,0
Median	mg/Nm <sup>3</sup> PCDD/F: ng/Nm <sup>3</sup>	12	0,50	1,0	0,1	3,5	82	0,35	0,0013	0,0020	0,013	0,0037	0,0030
Min	mg/Nm <sup>3</sup> PCDD/F: ng/Nm <sup>3</sup>	0,4	0,004	0,010	0,020	0,040	29,8	0,010	0,000050	0,00020	0,0011	0,0010	0,000050
Max	mg/Nm <sup>3</sup> PCDD/F: ng/Nm <sup>3</sup>	26,0	6,0	8,1	0,5	27,3	186,0	2,6	0,023	0,035	0,29	0,024	0,040
Standardabweichung	mg/Nm <sup>3</sup> PCDD/F: ng/Nm <sup>3</sup>	7,1	1,1	2,3	0,1	7,5	47,2	0,7	0,004	0,005	0,1	0,005	0,007

Tabelle 3: Emissionen aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoffkraftwerken

die gleiche Abscheidung ermöglicht wie ein Nassverfahren. Der Unterschied bei den Stickoxidemissionen ist nicht auf die Verfahrenswahl trocken oder nass zurückzuführen, sondern auf die Auswahl des Entstickungsverfahrens katalytisch oder nicht katalytisch. Da die selektive nichtkatalytische Reduktion (SNCR) häufiger in Kombination mit den Trockenverfahren als mit den Nassverfahren anzutreffen ist, ergibt sich bei den Trockenverfahren durchschnittlich eine um knapp zehn Prozentpunkte höhere Stickoxidemission als bei den Nassverfahren. Die Emissionen von Kohlenmonoxid und organischem Kohlenstoff können durch das Abgasreinigungsverfahren nicht beeinflusst werden, sondern sind durch die Verbrennungsbedingungen in der Feuerung bestimmt.

Die zunehmende Umstellung von Nass- auf Quasitrocken- oder Trockenverfahren ist durch eine steigende Energieeffizienz der Abfallverbrennungsanlagen begründet. Bei den Nassverfahren werden abwasserfreie und abwassererzeugende Verfahren unterschieden. Verfahren, die eine Einleitung von Abwässern erfordern, sind in Deutschland nicht genehmigungsfähig. Abwasserfreie Verfahren machen jedoch eine hohe Kesselaustrittstemperatur oder einen externen Sprühtrockner zur Verdampfung des anfallenden Abwassers notwendig, wodurch die Energieeffizienz der Anlage nachteilig beeinflusst wird. Bei Trockenverfahren kann die Kesselaustrittstemperatur sehr viel geringer und somit die Energienutzung im Kessel sehr viel höher liegen.

Für eine Frachtbetrachtung der Schadstoffe aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen ist eine Abschätzung des insgesamt emittierten Abgasvolumenstroms notwendig. Werden für die Abfallverbrennungsanlagen durchschnittlich 8.000 Jahresbetriebsstunden und eine Entstehung von 5.000 Normkubikmeter pro Stunde ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ ) trocken pro Tonne Abfall angenommen, so ergibt sich bei einer Gesamtkapazität im Jahr 2007 von 18,8 Millionen Tonnen (t) für den Gesamtabgasvolumenstrom eine Größenordnung von jährlich etwa 11,75 Millionen  $\text{Nm}^3/\text{h}$  trocken. In Abb. 3 sind die daraus resultierenden Jahresfrachten aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen und Monoersatzbrennstoffkraftwerken für die einzelnen nach 17. BImSchV limitierten Schadstoffe und Schadstoffgruppen dargestellt.

## 3 Herkunft und Wirkung von Luftschadstoffen

Im Folgenden werden die Herkunft und die Wirkung der bei der Verbrennung von Abfällen relevanten Luftschadstoffe beschrieben sowie der Anteil der thermischen Abfallbehandlung an der Gesamtemission bestimmt.

### 3.1. Staub

Staub wird in der Regel in die Kategorien Gesamtstaub, Feinstaub mit einer Korngröße kleiner 10 Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) (PM 10, particulate matter <10  $\mu\text{m}$ ) und Feinstaub mit ei-

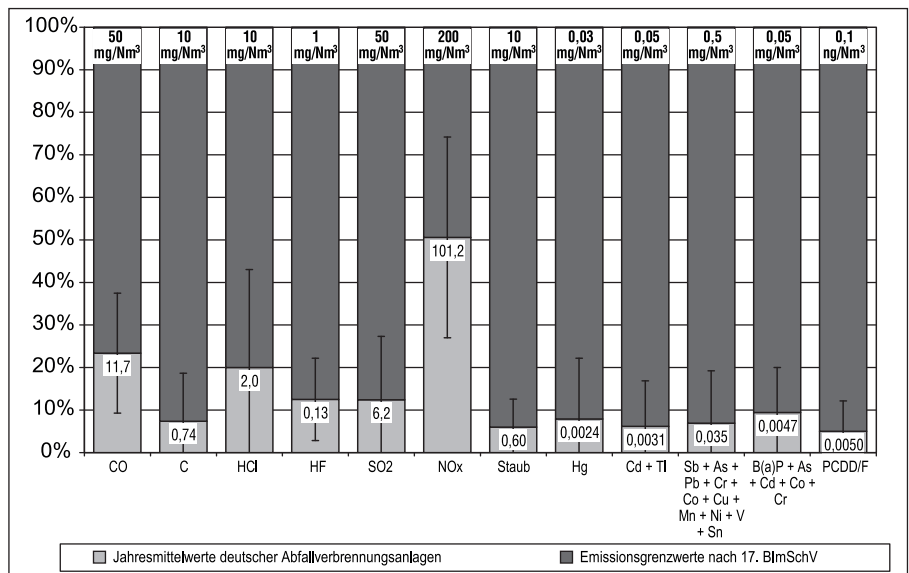


Abbildung 1: Emissionskonzentrationen deutscher Abfallverbrennungsanlagen (Jahresmittelwerte) im Vergleich zu den Grenzwerten der 17. BImSchV (Tagesmittelwerte) (Fehlerindikator: Standardabweichung)

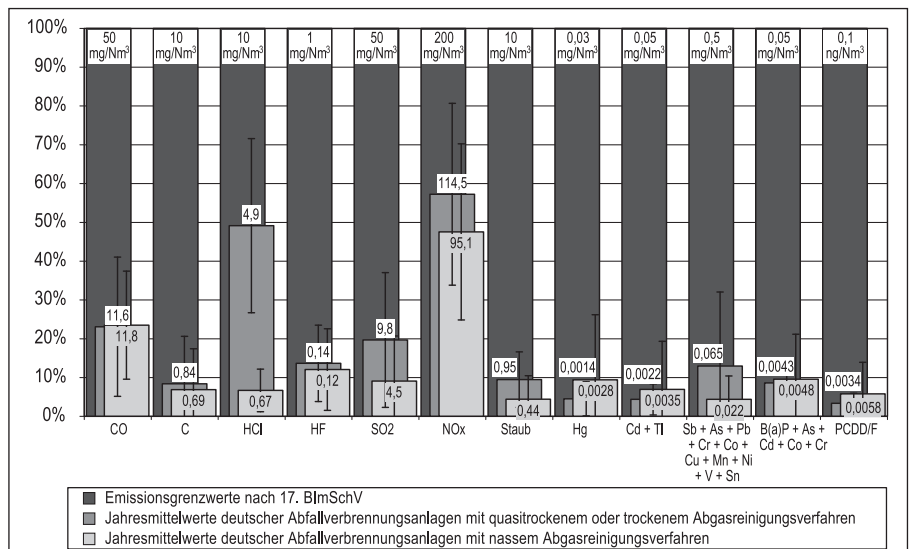


Abbildung 2: Emissionskonzentrationen deutscher Abfallverbrennungsanlagen mit Nassverfahren im Vergleich zu Emissionskonzentrationen deutscher Abfallverbrennungsanlagen mit quasitrockenen oder konditioniert trockenen Verfahren (Fehlerindikator: Standardabweichung)

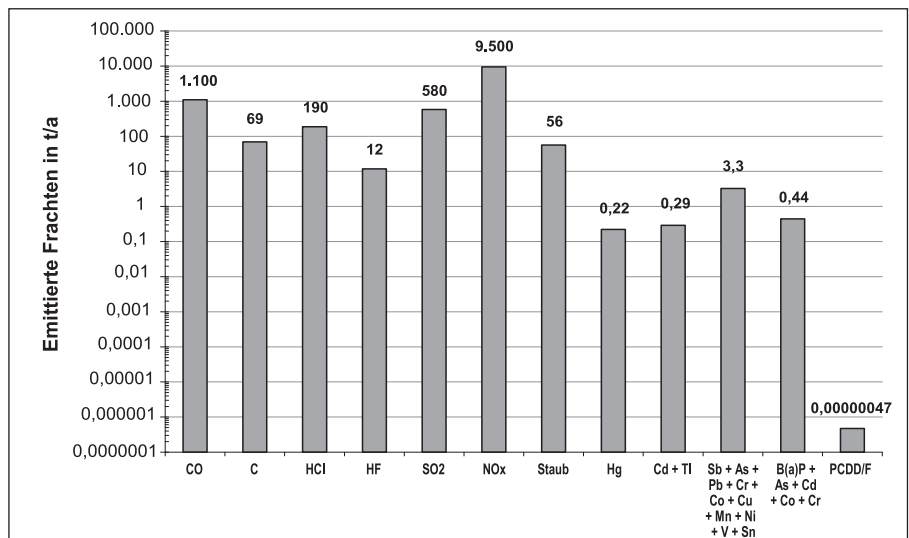


Abb. 3: Jahresemissionsfrachten deutscher Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoffkraftwerke (Stand: 2007)

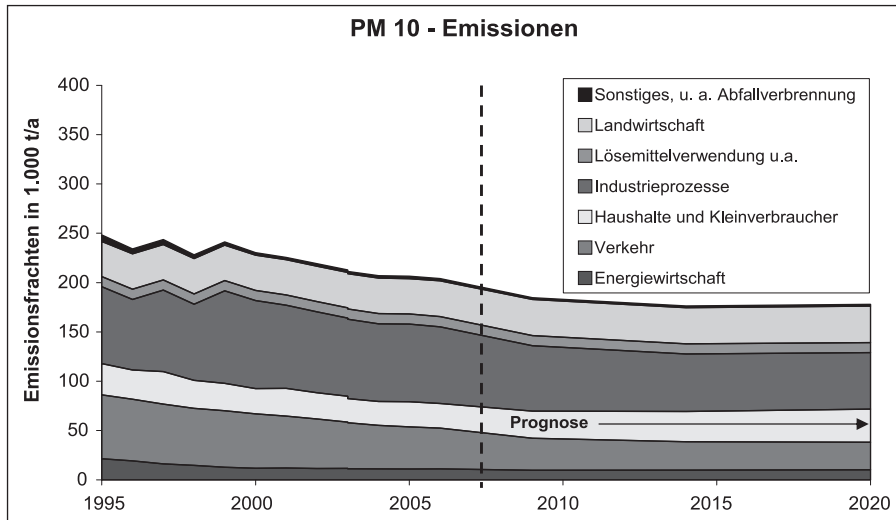


Abbildung 4: Staubemissionen (PM 10) nach Quellgruppen in Deutschland von 1995 bis 2007 sowie Prognose bis 2020. Quelle: Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (Hrsg.): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990-2007, klassische Luftschadstoffe. Im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm> (22.07.2009)

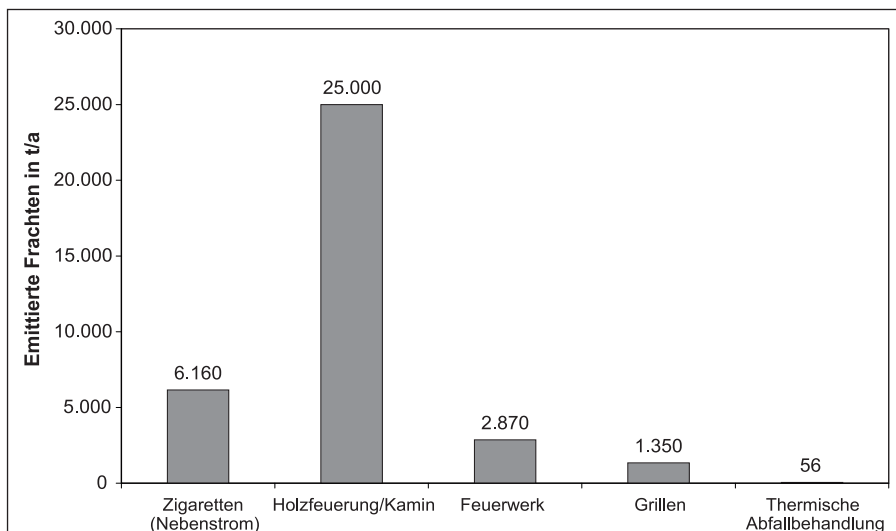


Abbildung 5: Feinstaubemissionen (PM 10) in Deutschland durch Zigarettenkonsum, Kaminnutzung, Feuerwerk und Grillen im Vergleich zur thermischen Abfallbehandlung

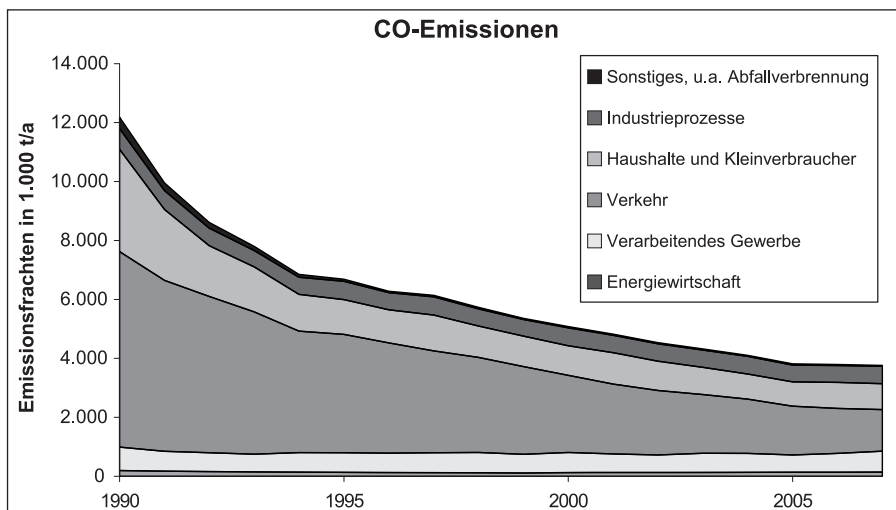


Abbildung 6: Kohlenmonoxidemissionen nach Quellgruppen in Deutschland von 1990 bis 2007. Quelle: Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (Hrsg.): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990-2007, klassische Luftschadstoffe. Im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm> (22.07.2009)

ner Korngröße  $< 2,5 \mu\text{m}$  (PM 2,5) unterteilt. Der Grenzwert für Staubemissionen gemäß der 17. BImSchV bezieht sich zwar auf den Gesamtstaub, aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen wird jedoch ausschließlich PM 10 emittiert und davon sogar etwa 80 Prozent PM 2,5. In Abb. 4 ist die Entwicklung der Emissionen an PM 10 in Deutschland nach Quellgruppe von 1995 bis 2007 sowie eine Prognose bis zum Jahr 2020 dargestellt. Danach lag die Gesamtemission an Feinstaub im Jahr 2007 bei 204.000 Tonnen. Größte Emittenten sind Industrieprozesse, Landwirtschaft, Verkehr sowie Haushalte und Kleinverbraucher. Die thermische Abfallbehandlung machte mit etwa 56 Tonnen pro Jahr (t/a) nur 0,03 Prozent der Gesamtfinstaubemissionen aus [13].

Um die Größenordnung deutlich zu machen, ist in Abb. 5 der Feinstaubtransfer aus der thermischen Abfallbehandlung anderen Emissionsquellen aus dem täglichen Leben wie Zigaretten, Kamin, Feuerwerk und Grillen gegenübergestellt.

Alleine der Nebenstrom einer Zigarette enthält im Durchschnitt etwa 44 mg Feinstaub, der Hauptstrom enthält noch einmal 15 bis 40 mg, allerdings wird dieser – zur Entlastung der Umwelt – sofort inhaliert und durch die Lungen des Rauchers gefiltert [2] [9]. Bei einem Konsum von 140 Milliarden Zigaretten pro Jahr in Deutschland (Stand: 2005) ergibt sich damit eine Gesamtemission von 6.160 t/a Feinstaub. Durch private Holzfeuerungen (Kamine) werden jährlich 25.000 Tonnen emittiert, durch Feuerwerke 2.870 Tonnen und durch das Grillen 1.350 Tonnen [1] [3]. Selbst bei Staubemissionen in der Höhe des Grenzwertes der 17. BImSchV ( $10 \text{ mg/Nm}^3 \text{ tr.}$ ) würde sich im Vergleich hierzu nur eine Emissionsfracht von 940 t/a aus der thermischen Abfallbehandlung ergeben.

## 3.2. Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid entsteht bei der unvollständigen Verbrennung von organischer Substanz. In Abb. 6 sind die Kohlenmonoxidemissionen in Deutschland nach Quellgruppen für die Jahre 1990 bis 2007 zusammengestellt.

Im Jahr 2007 wurden 3.760.000 Tonnen Kohlenmonoxid emittiert [13]. Die thermische Abfallbehandlung hatte mit etwa 1.100 Tonnen daran einen Anteil von etwa 0,029 Prozent. Die höchsten Emissionen wurden durch den Verkehr, Feuerungsanlagen von Haushalten und Kleinverbrauchern sowie Industrieprozesse verursacht.

## 3.3. Stickstoffoxide

Stickstoff (N) ist neben Phosphor und Kalium ein Hauptnährelement, das für das Pflanzenwachstum erforderlich ist. Stickstoff ist ein Baustein der Desoxyribonukleinsäure (DNA), von Proteinen, Enzymen sowie Chlorophyll und hat den größten Einfluss auf das Massenwachstum der Pflanzen. Langanhaltende, erhöhte Stickstoffeinträge über die Luft haben jedoch eine eutrophierende Wirkung auf Ökosysteme.

Während des Verbrennungsprozesses entstehen aus Stickstoff Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ). Bei konventionellen Feuerungen setzen sich die freiwerdenden Stickstoffoxide ungefähr zu 95 Prozent aus Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ) und zu 5 Prozent aus Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) zusammen. Das Stickstoffmonoxid wird in der Atmosphäre mit Luftsauerstoff zu Stickstoffdioxid oxidiert. In Verbindung mit Feuchtigkeit entsteht Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ), die einen wesentlichen Bestandteil des sauren Regens darstellt. Stickoxide werden über unterschiedliche Reaktionsmechanismen gebildet. Es werden Brennstoff- $\text{NO}_x$ , thermisches  $\text{NO}_x$  und promptes  $\text{NO}_x$  unterschieden.

Brennstoff- $\text{NO}_x$  entsteht aus dem organisch gebundenen Stickstoff im Brennstoff durch Oxidation mit Sauerstoff bereits bei Temperaturen um 800 Grad Celsius. Ein Großteil des Brennstoff- $\text{NO}_x$  wird durch Ausgasung mit den flüchtigen Bestandteilen des Brennstoffs, ein kleinerer Anteil auch durch Ausbrand der organischen Substanz freigesetzt. Thermisches  $\text{NO}_x$  bildet sich hingegen aus dem Luftstickstoff bei Temperaturen ab etwa 1.250 Grad Celsius. Die Bildungsrate nimmt exponentiell mit der Temperatur zu und steigt bei längeren Verweilzeiten. Dabei laufen die folgenden Reaktionen nach dem erweiterten Zeldovich-Mechanismus (Formeln 1 bis 3) ab:

- (1)  $\text{N}_2 + \text{O} \leftrightarrow \text{NO} + \text{N}^{\bullet}$
- (2)  $\text{N}^{\bullet} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}^{\bullet}$
- (3)  $\text{N}^{\bullet} + \text{OH}^{\bullet} \leftrightarrow \text{NO} + \text{H}^{\bullet}$

Die Bildung von promptem  $\text{NO}_x$  ist noch nicht vollständig geklärt. Der Einfluss der Verweilzeit und der Temperatur scheinen für die Entstehung von promptem  $\text{NO}_x$  eher untergeordnet zu sein. Bekannt ist, dass nach dem Fenimore-Mechanismus zunächst freie Kohlenwasserstoffradikale mit dem molekularen Luftstickstoff reagieren (Formel 4). Das dabei freiwerdende  $\text{N}^{\bullet}$ -Radikal setzt sich entsprechend den Reaktionsformeln (Formel 2) und (Formel 3) zu Stickstoffoxid um.

- (4)  $\text{CN}^{\bullet} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{HCN}^{\bullet} + \text{N}^{\bullet}$

Die Anteile der einzelnen Bildungsmechanismen an der Gesamtstickstoffoxidbildung werden bei der Verbrennung durch die Temperatur, den Luftüberschuss, den Stickstoffgehalt im Brennstoff sowie die Brennstoffmischung, die Betriebsweise der Anlage und deren Verschmutzungsgrad sowie das Vorhandensein von Verbindungen mit möglichem Katalyseffekt beeinflusst.

Die Stickstoffoxidemissionen in Deutschland haben sich in den letzten Jahren entsprechend Abb. 7 entwickelt. Größter Emittent war im Jahr 2007 mit 629.000 Tonnen der Verkehr [13].

Bei einer Gesamtemission von jährlich etwa 1.294.000 Tonnen liegt die thermische Abfallbehandlung mit etwa 9.500 Tonnen bei einem Anteil von 0,7 Prozent. Zur Erreichung der nationalen Emissionshöchstmenge von 1.051.000 t/a im Jahr 2010 wurden Minderungsmaßnahmen für Stickstoffoxid eingeführt [4]. Von diesen Maßnahmen ist mit der zusätzlichen Begrenzung von Stickoxiden im Jahresmittel auf 100

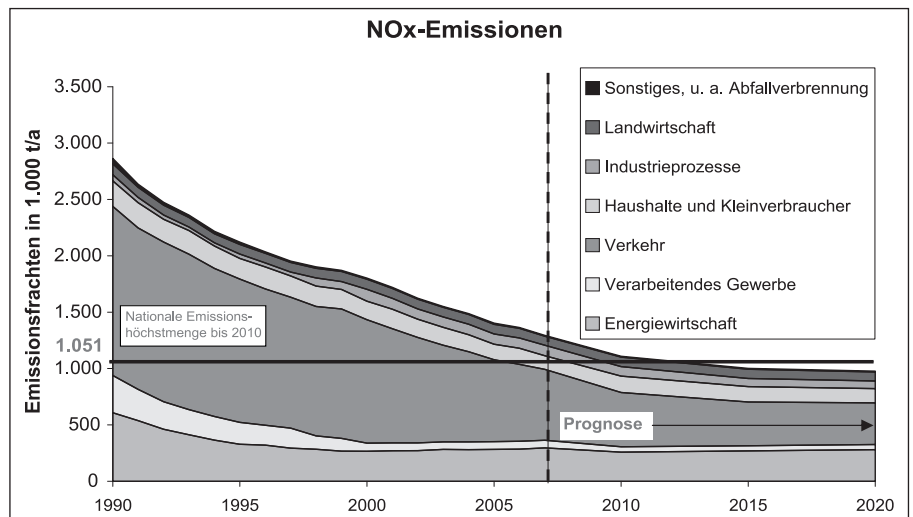


Abbildung 7:  $\text{NO}_x$ -Emissionen nach Quellgruppen in Deutschland von 1990 bis 2007 sowie Prognose bis 2020. Quelle: Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (Hrsg.): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990-2007, klassische Luftschadstoffe. Im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm> (22.07.2009)

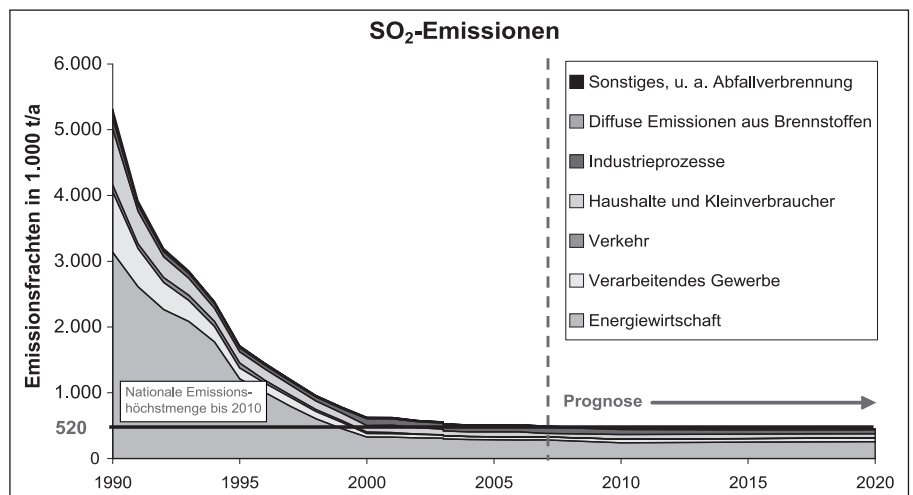


Abbildung 8:  $\text{SO}_2$ -Emissionen nach Quellgruppen in Deutschland von 1990 bis 2007 sowie Prognose bis 2020. Quelle: Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (Hrsg.): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990-2007, klassische Luftschadstoffe. Im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm> (22.07.2009)

mg/ $\text{Nm}^3$  trocken im Rahmen der Änderung der 17. BImSchV im Jahr 2009 auch die thermische Abfallbehandlung erfasst. Aufgrund des geringen Beitrags der thermischen Abfallbehandlung an der Gesamtemission hat diese Grenzwertanpassung für die Senkung der Gesamtstickstoffoxidemission in Deutschland jedoch so gut wie keine Auswirkungen.

### 3.4. Saure Schadstoffe

Im Bereich der thermischen Abfallbehandlung relevant sind die sauren Schadgase Chlorwasserstoff ( $\text{HCl}$ ), Fluorwasserstoff ( $\text{HF}$ ) und Schwefeloxide ( $\text{SO}_x$ ).

Chlor ( $\text{Cl}$ ) kommt in der Natur nicht elementar, sondern nur gebunden vor. Die wichtigsten Chlorverbindungen stellen die Chloride dar. Chlorid ist essentiell und ein wichtiger Baustein für den Wasserhaushalt und Transportvorgänge im Körper. Die häufigsten Chlorminerale sind Halit (Natriumchlorid), Sylvin (Kaliumchlorid) und Carnallit ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ).

Der Großteil des Chlors, das man in der Regel über Elektrolyse gewinnt, wird für die Synthese chlorhaltiger Verbindungen wie Vinylchlorid, dem Ausgangsstoff für die Produktion des Kunststoffes Polyvinylchlorid (PVC) verwendet. Chlorwasserstoff entsteht bei Verbrennungsprozessen aus den im Brennstoff vorhandenen Chlorverbindungen und bildet in Anwesenheit von Feuchtigkeit Salzsäure. Es ist ätzend und in hohen Konzentrationen giftig. Hauptverursacher der Chlorwasserstoffemissionen ist die Quellengruppe Industrie und Gewerbe. Aus der thermischen Abfallbehandlung wurden im Jahr 2007 etwa 190 Tonnen Chlorwasserstoff emittiert. Fluor ( $\text{F}$ ) kommt wie Chlor kaum elementar, sondern zum überwiegenden Anteil nur gebunden vor, hauptsächlich in Form der Minerale Fluorit ( $\text{CaF}_2$ ) oder Fluorapatit ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ). Während elementares Fluor hochtoxisch und stark ätzend ist, sind Fluorid-

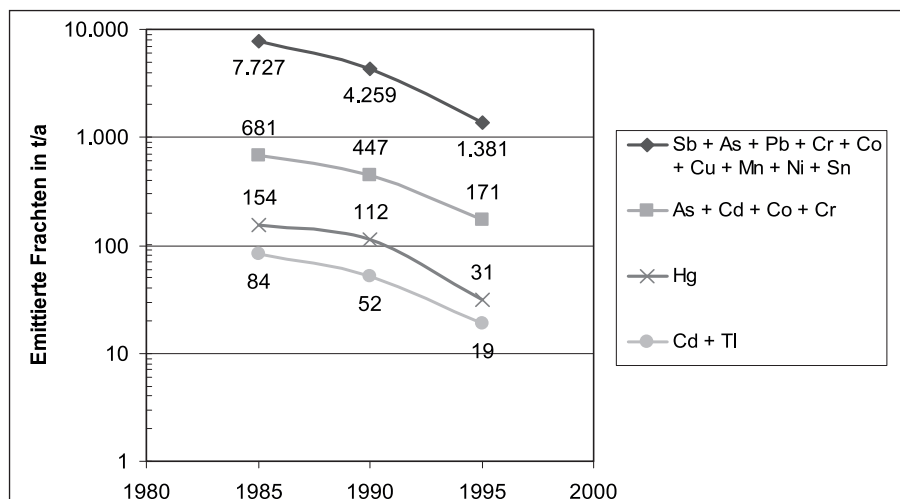


Abbildung 9: Schwermetallemissionen in Deutschland 1985 bis 1995. Quelle: Eigene Darstellung nach Jockel, W.; Hartje, J.: Die Entwicklung der Schwermetallemissionen in der Bundesrepublik Deutschland von 1985 bis 1995. Forschungsbericht des TÜV Rheinland Sicherheit und Umweltschutz GmbH im Auftrag des Umweltbundesamts, Berlin 1997

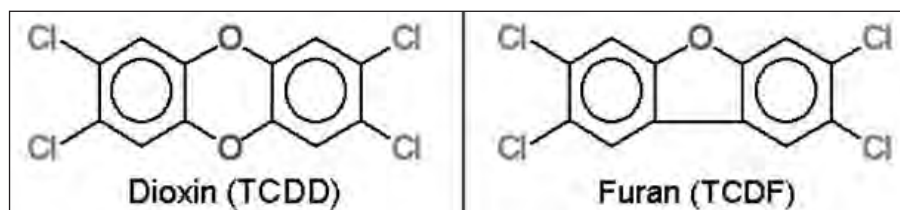


Abbildung 10: Strukturformeln für Dioxine und Furane am Beispiel von 2,3,7,8-Tetrachlor-Dibenzodioxin (TCDD) und 2,3,7,8-Tetrachlor-Dibenzofuran (TCDF)

Verbindung	Toxizitätsäquivalenzfaktor	
	I-TEF	WHO-TEF
<b>Polychlorierte Dibenzodioxine</b>		
2,3,7,8-Tetrachlorodibenzodioxin (TCDD)	1,0	1,0
1,2,3,7,8-Pentachlorodibenzodioxin (PeCDD)	0,5	1,0
1,2,3,4,7,8-Hexachlorodibenzodioxin (HxCDD)	0,1	0,1
1,2,3,6,7,8-Hexachlorodibenzodioxin (HxCDD)	0,1	0,1
1,2,3,7,8,9-Hexachlorodibenzodioxin (HxCDD)	0,1	0,1
1,2,3,4,6,7,8-Heptachlorodibenzodioxin (HpCDD)	0,01	0,01
1,2,3,4,6,7,8,9-Octachlorodibenzodioxin (OCDD)	0,001	0,0001
<b>Polychlorierte Dibenzofurane</b>		
2,3,7,8-Tetrachlorodibenzofuran (TCDF)	0,1	0,1
1,2,3,7,8-Pentachlorodibenzofuran (PeCDF)	0,05	0,05
2,3,4,7,8-Pentachlorodibenzofuran (PeCDF)	0,5	0,5
1,2,3,4,7,8-Hexachlorodibenzofuran (HxCDF)	0,1	0,1
1,2,3,6,7,8-Hexachlorodibenzofuran (HxCDF)	0,1	0,1
1,2,3,7,8,9-Hexachlorodibenzofuran (HxCDF)	0,1	0,1
2,3,4,6,7,8-Hexachlorodibenzofuran (HxCDF)	0,1	0,1
1,2,3,4,6,7,8-Heptachlorodibenzofuran (HpCDF)	0,01	0,01
1,2,3,4,7,8,9-Heptachlorodibenzofuran (HpCDF)	0,01	0,01
1,2,3,4,6,7,8,9-Octachlorodibenzofuran (OCDF)	0,001	0,0001

Tabelle 4: Internationale Toxizitätsäquivalenzfaktoren nach NATO/CCMS (I-TEF) von 1988 sowie Toxizitätsäquivalenzfaktoren der Weltgesundheitsorganisation (WHO-TEF) von 1998

nen für den Körper essentiell. Ein bekanntes anorganisches Fluorid ist Natriumfluorid, das als Holzschutzmittel und zum Konservieren von Klebstoffen verwendet wird. Organisch gebundene Fluorverbindungen sind beispielsweise die früher häufig als Treibmittel verwendeten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und das für Antihafbeschichtungen eingesetzte Polytetrafluorethen (PTFE, Teflon). Bei der Verbrennung von fluorhaltigen Brennstoffen entsteht das

stark ätzende Fluorwasserstoff (HF). Es bildet sich außerdem bei der Aluminiumherstellung sowie beim Brennen von Ziegeln und Feinkeramik. Durch die thermische Abfallbehandlung wurde im Jahr 2007 eine Emissionsfracht an Fluorwasserstoff von etwa 12 Tonnen verursacht.

Schwefel ist Bestandteil einiger Aminosäuren sowie vieler stoffaufbauender und stoffwechselaktiver Verbindungen. Eine ausreichende Schwefelversorgung steigert daher

Ertrag und Qualität der Ernteprodukte. Hohe Einträge von Schwefelverbindungen über den Luftpfad führen jedoch zur Versauerung von Böden. Die Entwicklung der Schwefeldioxidemissionen in Deutschland wird in Abb. 8 gezeigt.

Im Jahr 2007 wurden 494.000 Tonnen Schwefeldioxid emittiert [13], sodass die nationale Emissionshöchstmenge von 520.000 t/a für das Jahr 2010 bereits unterschritten ist. Mit einer Emissionsfracht von 580 t/a entspricht der Anteil der thermischen Abfallbehandlung an der Gesamtemission etwa 0,1 Prozent.

### 3.5. Schwermetalle

Als Schwermetalle werden Metalle mit einer Dichte von mindestens 4,5 Gramm pro Kubikzentimeter ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) bezeichnet. Einige Schwermetalle wie Chrom, Eisen, Kupfer und Zink sind als Spurenelemente in kleinen Mengen für den menschlichen Körper essentiell. Viele Schwermetalle können sich jedoch im menschlichen Organismus anreichern und dann zu Gesundheitsschäden führen.

Im Folgenden werden kurz die für die Abgasreinigung relevanten Schwermetalle, ihre Verwendung und ihre Wirkung aufgeführt.

**Antimon (Sb)** wird hauptsächlich zur Härtung von Blei und Zinklegierungen verwendet. Weiterhin dient es als Flammschutzmittel in Textilien und Kunststoffen. Es ist ein recht selten vorkommendes Metall, das aus dem Mineral Stibnit (Antimonglanz) gewonnen wird. Antimonfluoride sind als giftig und Antimonchloride als ätzend und umweltgefährlich eingestuft. Alle anderen Antimonverbindungen gelten als gesundheitsschädlich und umweltgefährlich. Metallisches Antimon selbst ist reizend.

**Blei (Pb)** ist ein wichtiger Bestandteil von Legierungen, zum Beispiel für Akkumulatoren, und wird häufig für rostschützende Grundierungen und Farben verwendet. Bleiorganische Verbindungen wie Tetraethylblei wurden lange Zeit als *Antiklopfmittel* Treibstoffen zugesetzt [5]. Sowohl Blei selbst als auch seine anorganischen Verbindungen sind toxisch. Der menschliche Körper kann Blei nur schlecht aufnehmen. Aus diesem Grund treten nur selten akute Vergiftungen auf. Bei einer kontinuierlichen Aufnahme können sich anorganische Bleiverbindungen jedoch in den Knochen, Zähnen und Haaren anreichern und dort auch nur sehr langsam abgebaut werden (Halbwertszeit: 20 Jahre). Blei wirkt primär toxisch auf Nieren, Hoden, den Gastrointestinaltrakt, das Nervensystem und die Biosynthese des Hämoglobins. Eine Vergiftung ist mit Müdigkeit, Appetitlosigkeit, Kopfschmerzen und Muskelschwäche verbunden. Blei reichert sich in hohem Maße im Boden an, beispielsweise als schwerlösliches Bleiphosphat ( $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{Pb}_4\text{O}(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ ), Bleicarbonat ( $\text{PbCO}_3$ ) oder Bleisulfid ( $\text{PbS}$ ) [7]. Der toxische Effekt von Blei auf Pflanzen ist wesentlich geringer als auf Menschen, allerdings besteht auch hier die Möglichkeit einer Anreicherung. Organische Bleiverbindungen weisen eine hohe Fettlöslichkeit auf

und werden daher schnell durch die Haut und die Lunge aufgenommen. Gelangen sie von dort aus in das Gehirn, treten Halluzinationen, Erregungszustände und Krämpfe auf. Als Spätfolgen sind Parkinsonismus und Lähmungserscheinungen nachgewiesen [5].

**Cadmium (Cd)** ist ein ubiquitär verbreitetes Schwermetall und wird hauptsächlich für Schutzüberzüge verwendet. In geringeren Mengen ist es auch in Legierungen, Batterien und Stabilisatoren enthalten. Cadmium wird hauptsächlich über Verbrennungsabgase und Phosphatdünger emittiert [7]. Eine orale Aufnahme von löslichen Cadmiumsalzen kann zu Erbrechen, Leberschäden und Krämpfen führen. Cadmium kann sich ebenso wie Blei im Körper anreichern (Halbwertszeit 10 Jahre) und dort Skelettschrumpfung verursachen. Eine chronische Cadmiumaufnahme ist mit Schleimhautentzündungen, Schäden der Lunge und Niere verbunden. Der toxische Effekt des Cadmiums resultiert aus der Substitution von Zink in zinkhaltigen Enzymen [7]. Im Tierversuch haben sich Cadmiumverbindungen als eindeutig krebserregend herausgestellt [5].

In der Natur existiert **Chrom (Cr)** nicht in reiner Form, sondern nur in Verbindungen. Chromerz, das *Chromit*, wird hauptsächlich in Russland, in Südafrika und auf den Philippinen abgebaut und zur Herstellung von Nichteisenlegierungen verwendet [8]. Von den existierenden Chromverbindungen sind lediglich die Oxidationsstufen III und VI von toxikologischer Bedeutung. Sechswertige Chromverbindungen sind etwa tausendmal giftiger als dreiwertige, da sie sehr viel besser durch die Zellmembranen aufgenommen werden können und enzymhemmende Wirkung besitzen [5]. Chrom(III) ist für Säugetiere ein essentielles Spurenelement und nur in größeren Mengen schädlich [8]. Lösliche Chromverbindungen sind starke Oxidationsmittel und können daher Verätzungen auf Haut und Schleimhäuten verursachen. Bei einer Vergiftung treten zusätzlich Magen-Darm-Entzündungen oder Leber- und Nierenschäden auf. Die Inhalation von Chrom-Stäuben kann Lungenkrebs zur Folge haben. Chrommetall kann zudem allergische Hautreaktionen hervorrufen [5].

**Kupfer (Cu)** tritt vorrangig als Mineral in Form von Kupferkies ( $\text{CuFeS}_2$ ) und Kupferglanz ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) auf. Es ist ein Spurenelement und somit für Tiere, Pflanzen und den Menschen essentiell. Kupfer hat jedoch die Eigenschaft in saurer Umgebung lösliche Salze zu bilden, die auf niedere Pflanzen schon in geringen Mengen toxisch wirken. Von tierischen und menschlichen Organismen wird es jedoch auch in größeren Mengen vertragen. Allerdings steht Kupfer in Verdacht, mutagenes und karzinogenes Potential zu bergen [6].

**Nickel (Ni)** wird aus nickelhaltigen Erzen wie Nickelmagnetkies gewonnen und zählt zu den Spurenelementen. Es wird vorwiegend als Überzugsmetall zum Korrosionsschutz eingesetzt. Nickel kann bei vorangegangener Sensibilisierung bei Kontakt zu allergischen Erkrankungen der Haut führen. In Form atembare Staub gilt Nickel als kanzerogen [6].

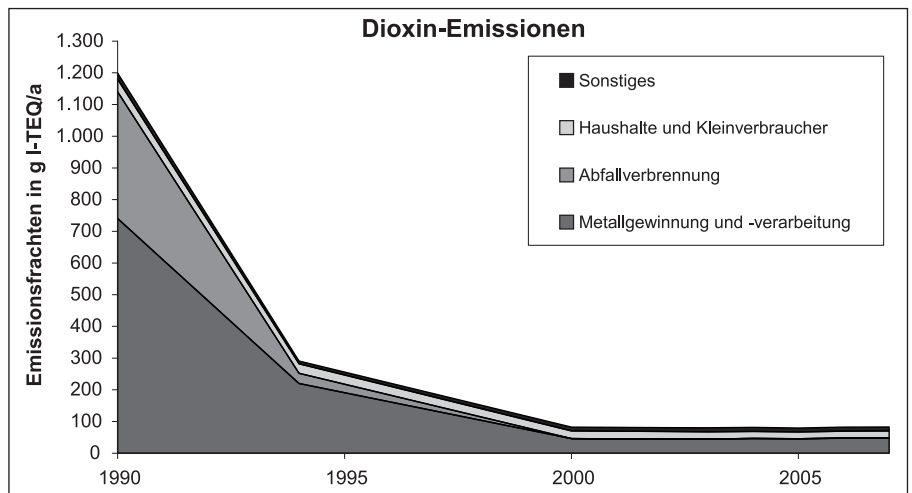


Abbildung 11: Dioxinmissionen nach Quellgruppen in Deutschland 1990 bis 2007. Quelle: Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (Hrsg.): Hintergrundinformation Dioxine: Chemikalienpolitik und Schadstoffe, REACH. Im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de> (05.05.2008) und Umweltbundesamt (Hrsg.): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990-2007, persistente organische Stoffe. Im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm> (22.07.2009)

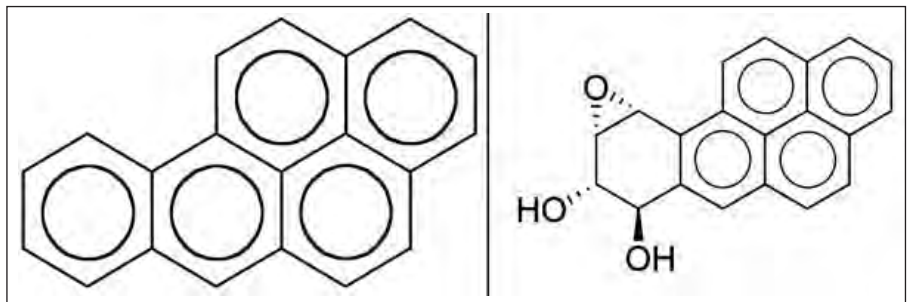


Abbildung 12: Strukturformeln von Benzo(a)pyren und seiner mutagen wirkenden Epoxidform (7,8 Dihydroxy-9,10-epoxy-7,8,9,10-tetrahydrobenzo(a)pyren)

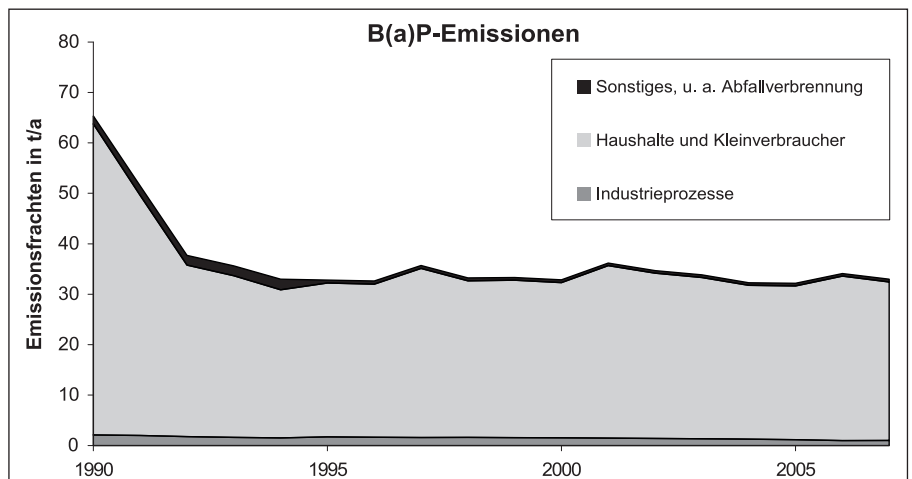


Abbildung 13: Emissionen an Benzo(a)pyren nach Quellgruppen in Deutschland von 1990 bis 2007. Quelle: Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (Hrsg.): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990-2007, persistente organische Stoffe. Im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm> (22.07.2009)

**Quecksilber (Hg)** tritt in der Natur vergleichsweise selten auf und ist im Unterschied zu allen anderen Metallen bei Raumtemperatur flüssig. Von wirtschaftlicher Bedeutung ist hauptsächlich Zinnober ( $\text{HgS}$ ). Quecksilber wird bei der Herstellung von Arzneimitteln, Batterien, Farben, Schädlingsbekämpfungsmitteln, in der Glas- und Kunststoffindustrie, der Kohle- und Erdölindustrie sowie der Erz-

und Mineralienaufarbeitung verwendet und in natürlichen Spuren Mengen auch aus Vulkanismus und Verwitterung, sowie gasförmigem Entweichen aus Meeren, Flüssen, Gletschern freigesetzt. Quecksilber weist in allen Bindungsformen toxische Wirkung auf, insbesondere als Quecksilberdampf, und kann Magen- und Darmkoliken, Schleimhautverätzungen und Nierenversagen auslösen.[6].

Der größte Anteil des produzierten **Zinks (Zn)** wird für die Verzinkung von Stahl und zur Herstellung von Zinklegierungen verwendet. Zink findet weiterhin Anwendung als Ätzmittel in der Textilindustrie, Reduktionsmittel in der Metallurgie und bei der Herstellung von Druckplatten und galvanischen Elementen [6]. Es gehört zu den essentiellen Spurenelementen und verursacht beim Menschen erst in sehr hohen Dosen Vergiftungserscheinungen.

**Zinn (Sn)** wird in der Regel aus Zinnstein gewonnen. Die salzförmigen Zinnverbindungen weisen nur eine geringe Giftigkeit auf, metallisches Zinn gilt auch in größeren Mengen als ungiftig. Es existieren allerdings einige hochtoxische Organozinnverbindungen, beispielsweise Tributylzinn, das aufgrund seiner bewuchshemmenden Wirkung in Antifoulingfarben Verwendung findet.

Die Schwermetallemissionen in Deutschland sind in den letzten Jahren stark zurückgegangen. Im Jahr 1995 lag die Emissionsfracht von Quecksilber bei 37 t/a, die Summe von Cadmium und Thallium bei 19 t/a, die Summe von Arsen, Cadmium, Kobalt und Chrom bei 171 t/a und die große Summe Schwermetalle entsprechend 17. BImSchV (ohne Vanadium) bei 1.381 t/a (siehe Abb. 9). Die größten Emittenten waren damals Feuerungsanlagen, die Eisen- und Stahlindustrie, die Nichteisenmetallindustrie, die Zementindustrie, die Glasindustrie sowie der Kraftfahrzeugverkehr. Die thermische Abfallbehandlung verursachte im Jahr 2007 nur noch eine Quecksilberemission von etwa 0,22 t/a sowie eine Cadmium- und Thalliumemission von 0,29 t/a. An der großen Gruppe der Schwermetalle (Sb, Ar, Pb, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, V, Sn) werden 3,3 t/a durch die thermische Abfallbehandlung verursacht, an der kleinen Gruppe (Ar, Cr, Co, Cd) 0,44 t/a.

### 3.6. Organische Schadstoffe

Der überwiegende Anteil der im Abfall enthaltenen organischen Schadstoffe wird bereits während des Verbrennungsprozesses zerstört. Bei unvollständiger Verbrennung kann es jedoch zur Freisetzung oder unter bestimmten Bedingungen zur Neubildung von organischen Schadstoffen in der thermischen Abfallbehandlungsanlage kommen. Eine Emissionsbegrenzung existiert für Dioxine und Furane sowie Benzo(a)pyren.

#### Dioxine und Furane

Bei polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen und Dibenzofuranen (PCDD/PCDF) – kurz Dioxinen und Furanen – handelt es sich um zwei Gruppen von chemisch ähnlich aufgebauten chlorierten organischen Verbindungen (siehe Abb. 10). Es existieren 75 verschiedene Dioxine und 135 Furane, die in den unterschiedlichsten Gemischen vorliegen können. Dioxine und Furane sind kaum natürlich abbaubar und reichern sich daher in der Nahrungskette an. Sie sind toxisch und karzinogen. Die Toxizität der Einzelverbindungen variiert jedoch erheblich. Der unterschiedlichen Stärke der Giftigkeit einzelner Dioxine und Furane wird mit dem *Toxizitätsäquivalenzfaktor* (TEF) Rechnung getragen. Er gibt die relative toxische Wirkung im Vergleich zu 2,3,7,8-Tetrachlor-Dibenzo-p-Dioxin an, das als das am toxischsten wirkende Dioxin gilt. Die Gehalte der Einzelverbindungen (Kongenere) multipliziert mit dem jeweiligen Toxizitätsäquivalenzfaktor ergeben aufaddiert das Toxizitätsäquivalent (TEQ) des Gemischs [12]. Für die toxikologische Beurteilung eines Gemischs werden in der Regel nur die in Tabelle 4 dargestellten sieben Dioxine und zehn Furane berücksichtigt. Deren Toxizitätsäquivalenzfaktoren werden entsprechend neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse immer wieder aktualisiert. Am Häufigsten kommen immer noch die vom Committee on Challenges of Modern Society (CCMS) der North Atlantic Treaty Organization (NATO) entwickelten internationalen Toxizitätsäquivalenzfaktoren (I-TEF) von 1988 zur Anwendung [11]. Diese sind auch die Grundlage für die Emissionsbegrenzungen aus Industrieanlagen, also auch für thermische Abfallbehandlungsanlagen. Eine Neubewertung der Toxizitätsäquivalenzfaktoren wurde von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) im Jahr 1998 veröffentlicht [16].

Dioxine und Furane entstehen ungewollt als Nebenprodukt bei der Verbrennung von organischen (kohlenstoffhaltigen) Verbindungen bei Vorhandensein bestimmter Vorläufersubstanzen wie organischen oder anorganischen Halogenverbindungen (insbesondere Chlor oder Brom). Bei Temperaturen oberhalb von 850 Grad Celsius werden sie zerstört, im Temperaturbereich von 300 bis 600 Grad Celsius können sie sich jedoch erneut bilden. Dieser Bildungsmechanismus ist unter dem Begriff der De-Novo-Synthese von Dioxinen bekannt.

Wie in Abb. 11 gezeigt, waren Abfallverbrennungsanlagen noch Anfang der neunziger Jahre – nicht zu unrecht – als *Dioxinschleudern* verschrien. Dieser schlechte Ruf hat sich allerdings bis heute gehalten, obwohl die Dioxinmissionen aus Abfallverbrennungsanlagen von 400 g I-TEQ im Jahr 1990 auf etwa 0,12 g I-TEQ im Jahr 2000 und damit um über 99,9 Prozent gesenkt werden konnten [12]. Trotz der Zunahme an Abfallverbrennungskapazität seit dem Jahr 2000 konnten die Dioxin- und Furanmissionen mit 0,13 g I-TEQ/a im Jahr 2007 auf einem ähnlich niedrigen Niveau gehalten werden. Damit machen sie nur noch etwa 0,16 Prozent der Gesamtemissionen aus.

#### Benzo(a)pyren

Benzo(a)pyren (B(a)p) gehört zur Gruppe der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) und gilt als Leitkomponente für deren Bewertung. Es entsteht bei der unvollständigen Verbrennung von organischer Substanz und wird im Körper in eine mutagene und damit krebserregende Epoxidform umgewandelt (siehe Abb. 12). In Abb. 13 sind die Emissionen an Benzo(a)pyren in Deutschland von 1990 bis 2007 zusammengestellt. Im Jahr 2007 wurden insgesamt 33 Tonnen emittiert. Aus der thermischen Abfallbehandlung stammen hiervon nach Aussage des Umweltbun-

desamts nur knapp 3,5 mg und damit ein Anteil von nur 0,00000001 Prozent an der Gesamtemission [13]. Der überwiegende Anteil an Benzo(a)pyren gelangt über Feuerungsanlagen aus Haushaltungen in die Umwelt. Auch beim Grillen und Rauchen (Hauptstrom: 5 bis 78 Nanogramm (ng), Nebenstrom: 15 bis 780 ng pro Zigarette) entsteht Benzo(a)pyren. ♦

#### Literatur

- [1] **Behne, A.:** Die Nebenwirkungen der Behaglichkeit: Feinstaub aus Kamin und Holzofen. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau, 2007
- [2] **Brunnemann, K. D.; Kagan, M. R.; Cox, J. E.; Hoffmann, D.:** Analysis of 1,3-butadiene and other selected gas-phase components in cigarette mainstream and sidestream smoke by gas chromatography – mass selective detection. *Carcinogenesis* 11: 1863-1868, 1990
- [3] **Dahlern, I. von:** Neue Umweltzonen: Kampf gegen ein Phantom. Frankfurter Allgemeine Zeitung. Im Internet: [www.faz.net](http://www.faz.net) (8.06.2008)
- [4] **Diegmann, V.; Pfäfflin, F.; Wiegand, G.; Wursthorn, H.; Dünnebeil, F.; Helms, H.; Lambrecht, U.:** Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub und Stickstoffdioxid. Forschungsbericht 204 42 222 im Auftrag des Umweltbundesamts (Hrsg.), UBA-Texte 22/07
- [5] **Eisenbrand, G.; Metzler, M.:** Toxikologie für Chemiker: Stoffe, Mechanismen, Prüfverfahren. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1994
- [6] **Falbe, J.; Regitz M. (Hrsg.):** Römpp Chemie Lexikon, 10. Auflage, Thieme Verl., Stuttgart, 1996
- [7] **Fellenberg, G.:** Chemie der Umweltbelastung. Teubner Studienbücher, Stuttgart 1990
- [8] **Greenwood, N. N.; Earnshaw, A.:** Chemie der Elemente VCH, Weinheim 1990
- [9] **International Agency for Research on Cancer (Hrsg.):** IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans. Tobacco smoking. Volume 38, 1986
- [10] **Jockel, W.; Hartje, J.:** Die Entwicklung der Schwermetallemissionen in der Bundesrepublik Deutschland von 1985 bis 1995. Forschungsbericht des TÜV Rheinland Sicherheit und Umweltschutz GmbH im Auftrag des Umweltbundesamts, Berlin 1997
- [11] **North Atlantic Treaty Organization, Committee on Challenges of Modern Society (NATO/CCMS):** International toxicity equivalency factor (TEF) method of risk assessment for completely mixtures of dioxins and related compounds. Pilot study on international information exchange on dioxins and related compounds, report no. 176, 1988
- [12] **Umweltbundesamt (Hrsg.):** Hintergrundinformation Dioxine: Chemikalienpolitik und Schadstoffe, RE-ACH. Im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de> (05.05.2008)
- [13] **Umweltbundesamt (Hrsg.):** Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990-2007, klassische Luftschadstoffe. Im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm> (22.07.2009)
- [14] **Umweltbundesamt (Hrsg.):** Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990-2007, Schwermetalle. Im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm> (22.07.2009)
- [15] **Umweltbundesamt (Hrsg.):** Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990-2007, persistente organische Stoffe. Im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm> (22.07.2009)
- [16] **Van den Berg et al.:** Toxic Equivalency Factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for Humans and Wildlife Environmental Health Perspectives Vol 106, No 12, 1998

Dr.-Ing. Margit Löschau arbeitet bei der Pöyry Energy GmbH in Hamburg als Planungsingenieurin für Kraftwerke.

Kontakt:  
Borsteler Chaussee 51  
D-22453 Hamburg  
Tel. 040 69200-120  
Fax: -69200-229, eMail:  
[Margit.Loeschau@poyry.com](mailto:Margit.Loeschau@poyry.com)  
Internet: <http://www.energy.poyry.de/>

