

Norbert Ebeling

Abluft und Abgas

Reinigung und Überwachung

 **WILEY-VCH**

Weinheim · New York · Chichester
Brisbane · Singapore · Toronto

This Page Intentionally Left Blank

Norbert Ebeling

Abluft und Abgas

Reinigung und Überwachung

 **WILEY-VCH**

Praxis des technischen Umweltschutzes

Herausgegeben von
Josef Kwiatkowski und Claus Bliefert

- *V. Neitzel, U. Iske*
Abwasser
- *M. Nöthe*
Abfall
- *N. Ebeling*
Abluft und Abgas

Weitere geplante Titel:

- Technisches Umweltmanagement
- Produktionsintegrierter Umweltschutz
- Anlagenbezogener Umweltschutz

Norbert Ebeling

Abluft und Abgas

Reinigung und Überwachung

 **WILEY-VCH**

Weinheim · New York · Chichester
Brisbane · Singapore · Toronto

Professor Dr.-Ing. Norbert Ebeling
Zum Esch 74
D-48612 Horstmar

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ebeling, Norbert:

Abluft und Abgas : Reinigung und Überwachung / Norbert Ebeling.

Hrsg. von Josef Kwiatkowski und Claus Bliefert. – Weinheim ;

New York ; Chichester ; Brisbane ; Singapore ; Toronto : Wiley-VCH, 1999

(Praxis des technischen Umweltschutzes)

ISBN 3-527-29621-2

© WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69469 Weinheim (Federal Republic of Germany), 1999

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

Umschlaggrafik: Grafik-Design Schulz, D-67136 Fußgönheim

Druck: betz-druck GmbH, D-64291 Darmstadt

Bindung: Großbuchbinderei J. Schäffer, D-67269 Grünstadt

Printed in the Federal Republic of Germany

Geleitwort der Herausgeber

Der Weg vom „produktionsintegrierten Umweltschutz“ über „Clean Production“ zu „Clean and Economical Production“ ist verheißungsvoll und muß weiter beschrritten werden. Dazu müssen Ökologie und Ökonomie in Einklang gebracht werden. Dies verlangt heute der moderne Wettbewerb vom Planer und Betreiber verfahrenstechnischer Anlagen. Der Praktiker muß sich mit aktuellen Informationen zur Umweltechnik und zum Umweltschutz sachkundig machen, und zwar anschaulich und praxisnah! Im besonderen geht es darum, Emissionen zu vermindern oder zu vermeiden.

Für diese Buchreihe konnten wir wissenschaftlich ausgewiesene Praktiker aus Industrie und Behörden als Autoren gewinnen. In den einzelnen Bänden stellen diese Fachleute dem Leser Hilfsmittel zur Verfügung, die aus dem „Alltagsgeschäft“ heraus geboren wurden. Häufig werden Tips und Beispiele aus der Praxis zusammengefaßt in Ablaufdiagrammen, Arbeitsanweisungen und Checklisten. Zusammen mit dem Text sollen sie jedem helfen, der im Betrieb, in einer Behörde oder in der Ausbildung mit Fragen des technischen Umweltschutzes konfrontiert wird, zu einer Problemlösung zu gelangen, die die ökonomischen *und* ökologischen Randbedingungen sowie die gesetzlichen Vorgaben gleichermaßen einbezieht.

Oer-Erkenschwick und Schöppingen,
November 1997

Josef Kwiatkowski
Claus Bliefert

This Page Intentionally Left Blank

Vorwort

Die industrielle Produktion liefert die unterschiedlichsten Güter, die einen Teil der Lebensqualität des Menschen sichern. Bei der Erzeugung dieser Güter sind schädliche Abfälle nicht immer zu vermeiden. Insbesondere kommt es durch gasförmige, flüssige und feste Schadstoffe zur Belastung der Umgebungsluft. Diese ist lebensnotwendig, und ihre Reinhaltung – die Erhaltung ihres natürlichen Zustands – ist eine der wichtigsten Aufgaben.

Gütererzeugung ohne Rücksicht auf die Umwelt oder ein industriefeindlicher Umweltschutz wären in letzter Konsequenz verheerend. Die Produktion zu begrenzen oder eine gewisse Belastung der Umgebungsluft zu tolerieren, sind keine langfristigen Lösungen. Nur zum Teil ist es angebracht, auf die natürlichen Stoffkreisläufe oder die Selbstreinigungskräfte der Natur zu vertrauen. Die große Bevölkerungsdichte und der hohe Lebensstandard in den Industrienationen erfordern eine Güterproduktion, die verbunden ist mit einer Belastung der Umwelt, besonders der Luft, die allein auf natürliche Weise nicht abgebaut werden könnte.

Weiter hilft nur die systematische Reinigung der Abluft mit Methoden, wie sie in der Verfahrenstechnik oder im Chemieingenieurwesen gebräuchlich sind. Für die Abscheidung und, sofern im Prinzip möglich, Vernichtung der Schadstoffe liefert die Verfahrenstechnik Lösungen, die in diesem Buch vorgestellt werden. Auch nichtstoffliche Emissionen wie Schall oder verschiedene Arten von Strahlung können mit Methoden begrenzt werden, die hier zumindest kurz vorgestellt werden.

Technisch kann man mit entsprechend hohem Aufwand Emissionen zwar drastisch reduzieren, nicht aber ganz verhindern. Eine gewisse Belastung der Umwelt muß toleriert werden und ist oft dann nicht schädlich, wenn bestimmte Schwellenwerte der Schadstoffmenge und der Konzentration nicht überschritten werden.

Der Gesetzgeber hat Rechtsvorschriften erlassen, die Grenzwerte für die verschiedenen Spezialfälle festlegen. Technische Richtlinien regeln die Umsetzung in die Praxis. *Kapitel 1* liefert eine Einführung in diese Vorschriften und ihre Interpretation.

Eine wesentliche Schadstoffgruppe sind feste Schwebstoffe, Stäube. *Kapitel 2* stellt die verschiedenen Staubabscheideverfahren, ihre unterschiedlichen physikalischen Grundlagen

und wesentliche technische Ausführungen vor. Die jeweiligen Anwendungsgebiete und Vor- und Nachteile werden benannt und so gegenübergestellt, daß der Leser, der eine Lösung für sein spezifisches Problem sucht, eine konkrete Entscheidungshilfe erhält.

Kapitel 3 behandelt analog hierzu die Beseitigung flüssiger Schadstoffe, die von der Abluft mitgerissen wurden. Es ist verhältnismäßig kurz, da die meisten Fragen durch Querverweise zu Kapitel 2 beantwortet werden können, denn die physikalischen Grundlagen der Verfahren zur Beseitigung von Tropfen und Stäuben sind weitgehend identisch.

Vergleichsweise umfangreich ist *Kapitel 4*, das die Methoden beschreibt, gasförmige Schadstoffe zu entfernen. Die wesentlichen verfahrenstechnischen Grundoperationen, die hier zur Auswahl stehen, sind die Gaswäsche, die Adsorption an porösen Feststoffen, die katalytische Umsetzung, die Abgasverbrennung, die biologische Reinigung und einige Sonderverfahren. Dieses Buch enthält neben der physikalisch-technischen Beschreibung der Verfahren einen Vergleich, der dem Leser, der vor einem Abluftproblem steht, eine Orientierung bieten soll.

Die Verhinderung nichtstofflicher Emissionen wie Schall, Licht, Elektrosmog und Radioaktivität gehört zwar nicht zum eigentlichen Thema dieses Buches, wird aber in *Kapitel 5* behandelt, da vielfach dieselben Anlagen betroffen sind, die auch Staub und Abgas emittieren. Umweltschutzanlagen können Verursacher von Schall und lästigen Lichtemissionen sein. Das Bundes-Immissionsschutzgesetz bezieht sich ohnehin sowohl auf stoffliche als auch auf nichtstoffliche Emissionen.

Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Abluftüberwachung, ihrer Organisation und den einzuhaltenden Vorschriften, nicht aber mit der Meß- und Analysentechnik. Auf entsprechende Spezialliteratur wird im Literaturverzeichnis zu diesem Kapitel verwiesen.

Wer sich mit einem konkreten Abluftproblem beschäftigt, kann nur selten die Lösung aus einer Beschreibung aller Gesichtspunkte der Abluft- und Abgasreinigung ablesen. Meist muß eine solche Problemlösung in einem langwierigen Prozeß erarbeitet werden, der sich prinzipiell nicht restlos schematisieren läßt. *Kapitel 7* liefert mit einem "Entscheidungsbaum" einen Schritt in diese Richtung. Er berücksichtigt neben den technischen auch wirtschaftliche und topographische Besonderheiten.

Ein wesentlicher Bestandteil des Buches sind die Anhänge, weil sie zusätzlich zu dem in Fachbüchern allgemein Üblichen aktuelle Anschriften wichtiger Behörden und Institutionen enthalten, die im konkreten Fall zu Rate gezogen werden können. Bezugsquellen der maßgeblichen juristischen und technischen Vorschriften werden benannt.

Mein Dank gilt jenen Firmen und Institutionen, die ausgezeichnetes Bild- und Informationsmaterial der Anwendungspraxis zur Verfügung gestellt haben, insbesondere Herrn Ralf Feldhaus vom Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. Besonderer Dank gebührt Herrn Martin Sobota, der mich bei der Literatursuche, beim Erstellen der Abbildungen und formalen Bearbeiten des Buches wesentlich unterstützt hat, Herrn Frank Erdt, der das Manuskript mehrmals kritisch korrekturgelesen hat, und Herrn Jörg Hecke, der seinen Drucker zur Verfügung gestellt hat. Danken möchte ich den Herausgebern Herrn Prof. Dr. Claus Bliefert und Herrn Prof. Dr. Josef Kwiatkowski, der mir seinerzeit die Aufgabe übertragen hat, dieses Buch zu schreiben. Mein Dank gilt auch dem WILEY-VCH Verlag, hier insbesondere dem Lektor Herrn Dr. Steffen Pauly, Frau Claudia Grössl und dem Herstellungsteam. Zuletzt möchte ich auch meiner Frau danken, die mich ideell und mit viel Verständnis für den Zeitbedarf unterstützt hat.

Horstmar-Leer, im Februar 1999

Norbert Ebeling

This Page Intentionally Left Blank

Inhalt

1 Grundlagen 1

- 1.1 Die Luft als Teil des menschlichen Lebensraumes 1
- 1.2 Gesetzeslage und Grenzwerte 4
- 1.3 Interpretation und Anwendung von Vorschriften 7
- 1.4 Literatur 17

2 Abscheidung von Feststoffen 21

- 2.1 Staubquellen 21
- 2.2 Entstaubungstechnik 26
 - 2.2.1 Entstaubung durch Sedimentation 32
 - 2.2.2 Fliehkraftentstauber oder Zyklone 32
 - 2.2.3 Filternde Abscheider 37
 - 2.2.4 Elektroentstauber 45
 - 2.2.5 Waschentstauber 55
 - 2.2.6 Betriebssicherheit von Entstaubern 59
- 2.3 Technisch-wirtschaftlicher Verfahrensvergleich 61
- 2.4 Literatur 64

3 Abscheidung von Flüssigkeiten 69

3.1 Tröpfchenbildung 69

3.2 Abscheider 69

3.3 Literatur 71

4 Abscheidung gasförmiger Schadstoffe 73

4.1 Absorption 73

4.1.1 Gaswäscherbauarten und ihre Berechnung 82

4.1.2 Rauchgasentschwefelung 100

4.1.3 Absorber für Rückstandsverbrennungsanlagen 115

4.2 Adsorption 118

4.2.1 Physikalische Grundlagen 118

4.2.2 Adsorptionsmittel 125

4.2.3 Adsorberbauarten im Vergleich 127

4.3 Katalytische Abgasreinigung 139

4.3.1 Grundlagen 139

4.3.2 Rauchgasentstickung 141

4.3.3 Dreiwegekatalysatoren für motorische Zwecke 150

4.4 Thermische und katalytische Nachverbrennung 151

4.5 Direktverfahren 158

4.6 Biologische Verfahren 159

4.7 Zusammenfassung und Ratgeber 164

4.8 Literatur 166

5 Nichtstoffliche Emissionen 177

- 5.1 Schallschutz 177
- 5.2 Störende Lichtemissionen 181
- 5.3 Elektrosmog 182
- 5.4 Strahlenschutz 184
- 5.5 Literatur 186

6 Emissionsüberwachung 189

- 6.1 Gesetzliche und theoretische Grundlagen 189
- 6.2 Methoden und Anwendungen 191
- 6.3 Literatur 193

7 Der systematische Weg von der Problemstellung zur technischen Lösung 195

- 7.1 Allgemeiner Ratgeber 195
- 7.2 Ablaufdiagramme 198
- 7.3 Arbeitsanweisungen und Checklisten 206
- 7.4 Literatur 211

Anhang 1 213

- A 1.1 Behördenanschriften 213
- A 1.2 Anschriften anerkannter Meßinstitute 217

Anhang 2 223

- Bezugsquellen juristischer und technischer Vorschriften 223

Anhang 3 225

Nachschlagewerke und weiterführende Literatur 225

Register 227

Häufig verwendete Formelzeichen und zugehörige übliche Einheiten

a	volumenspezifische Austauschfläche	m^2/m^3
A	Fläche, Querschnittsfläche	m^2
c_i	Konzentration des Stoffes i in einem Gas	kmol/m^3 oder kg/m^3
Cu	Cunningham-Zahl	
d	mathematisches Differential	
d	Durchmesser (allgemein)	m
∂	mathematische Differential (partielle Ableitung)	
$D(x)$	Durchgangssummenkurve	
D_{iG}	Diffusionskoeffizient der Komponente i in der Gasphase	$\text{kmol}/(\text{m}\cdot\text{h})$
D_{iL}	Diffusionskoeffizient der Komponente i in der Flüssigphase	$\text{kmol}/(\text{m}\cdot\text{h})$
e	Elementarladung, Ladung eines Elektrons	C
e	Basis des natürlichen Logarithmus	
E	elektrische Feldstärke	V/m
f	projizierte Fläche (im Elektroentstauber)	$\text{m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{s})$
F	Kraft (allgemein)	N
g	Fallbeschleunigung, Erdbeschleunigung	m/s^2
G	Gewichtskraft	N
\dot{G}	Gasstrom	mol/s
h	Höhe, Dicke (allgemein)	m
$HETS$	Höhe einer theoretische Stufe	m
H_i	Henry-Koeffizient für die Lösung des Stoffes i in einer Flüssigkeit	bar
HTU	Höhe einer Übergangseinheit	m
K	Boltzmann-Konstante	J/K
K_{iG}	gasseitiger Stoffdurchgangskoeffizient	$\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
K_{iL}	flüssigkeitsseitiger Stoffdurchgangskoeffizient	$\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
Kn	Knudsen-Zahl	
l	Länge (allgemein), Abstand	m
L_p	Schalldruckpegel	
L_P	Schalleistungspegel	
\dot{L}	Flüssigkeitsstrom	mol/s
M	Masse	kg
n_i	Stoffmenge des Stoffes i	mol
\dot{n}_i	Flächenspezifischer Stoffmengenstrom der Komponente i	$\text{Kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$
\dot{N}_i	Stoffmengenstrom der Komponente i	kmol/h
Nu	Nusseltzahl	
p	Druck (allgemein)	bar oder N/m^2
p_D	Dampfdruck	bar

p_i	Partialdruck der mit i bezeichneten Komponente	bar
p_{0i}	Dampfdruck der mit i bezeichneten Komponente	bar
Pr	Prandlzahl	
q	elektrische Ladung	C
$q(x)$	relative Häufigkeit, Verteilungsdichte	mm ⁻¹
R	Gaskonstante	J/(mol·K)
r	Radius	m
s	Abstand	m
Re	Reynoldszahl	
$R(x)$	Rückstandssummenkurve	
Sc	Schmidtzahl	
Sh	Sherwoodzahl	
$S(v)$	innere Oberfläche einer Schüttung bezogen auf das Volumen des Feststoffs	m ² /m ³
T	Temperatur	K
U	elektrische Spannung	V
U	Umfang	m
v	Geschwindigkeit (allgemein)	m/s
\bar{v}	Anströmgeschwindigkeit, Leerrohrgeschwindigkeit	m/s
w	effektive Wanderungsgeschwindigkeit (im Elektroentstauber)	m/s
We	Weberzahl	
x	Partikeldurchmesser	mm
x_i	Stoffmengenanteil der Komponente i in der Flüssigphase	mol/mol
X_i	Beladung der Flüssigphase mit dem Stoff i	mol/mol
X_i	Beladung einer Oberfläche mit dem Stoff i (Adsorption)	kmol/m ²
y_i	Stoffmengenanteil der Komponente i in der Dampfphase	mol/mol
Y_i	Beladung der Gasphase mit dem Stoff i	mol/mol
α_i	Bunsenscher Absorptionskoeffizient	m ³ /(m ³ ·bar)
β_{iG}	gasseitiger Stoffübergangskoeffizient	kmol/(m ² ·s)
β_{iL}	flüssigkeitsseitiger Stoffübergangskoeffizient	kmol/(m ² ·s)
γ	Aktivitätskoeffizient	
δ_{iG}	gaseitige Grenzschichtdicke	m
δ_{iL}	flüssigkeitsseitige Grenzschichtdicke	m
Δ	Differenz	
ε	Porosität, Hohlraumanteil	
ε_0	absolute Dielektrizitätskonstante	
η	Zähigkeit, dynamische Viskosität	N·s/m ²
η	Entstaubungsgrad (allgemein)	
η_G	Gesamtentstaubungsgrad	
$\eta_{S(x)}$	Stufenentstaubungsgrad	
ϑ	Temperatur	°C
λ	freie Weglänge	m

μ	Umwegfaktor	
ν	kinematische Viskosität	$l/(m \cdot s)$
π	Kreiszahl	
ρ	Dichte (allgemein)	kg/m^3
ρ_n	Dichte eines Fluids, eines Gases oder einer Flüssigkeit	kg/m^3
σ	Oberflächenspannung	N/m
φ	relative Feuchtigkeit	

This Page Intentionally Left Blank

1 Grundlagen

1.1 Die Luft als Teil des menschlichen Lebensraumes

Luft gilt seit dem Altertum als eines der vier "Elemente" und ist bezüglich ihrer Bedeutung für das menschliche Leben gleichrangig anzusehen mit dem Wasser. Die hohe Wertschätzung der Luft in alter Zeit ist bemerkenswert, da man von ihrer Natur sehr lange nur eine verschwommene Vorstellung hatte, ist sie doch unsichtbar und leichtflüchtig, wenn auch in Form von Wind deutlich spürbar. Otto von Guericke bewies als erster die Existenz des Luftdrucks und führte spektakuläre Experimente [1.1] zu seiner quantitativen Bestimmung durch. Lavoisier lieferte die ersten stöchiometrisch korrekten Untersuchungen zur Verbrennung mittels Luftsauerstoff [1.2]. Seitdem haben sich die Kenntnisse der physikalischen und chemischen Natur der Luft erheblich vermehrt, und entsprechende Beschreibungen und Tabellenwerke sind reichlich vorhanden (für technische Zwecke insbesondere der VDI-Wärmeatlas [1.3]).

Luft besteht bekanntlich im wesentlichen aus Stickstoff und Sauerstoff. In geringen Mengen enthält sie Argon, Kohlendioxid und Wasserdampf sowie eine Vielzahl weiterer Stoffe, die allerdings nur in Spuren nachweisbar sind (Tab. 1-1). Die Bedeutung sauberer Luft für das Leben ist allgemein bekannt und soll an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden. Die chemischen Prozesse in der Lufthülle sind vielfältig und beruhen auf verschiedenen natürlichen Mechanismen [1.4, 1.5]. Natürliche Luft kann lokal durchaus gasförmige Schadstoffe enthalten [1.6], zum Beispiel Schwefelverbindungen infolge Vulkanismus [1.7], und ist je nach Standort, Jahreszeit und meteorologischer Situation unterschiedlich hoch mit feinen Feststoffen beladen. Neben Sand sind hier Pflanzenpollen zu nennen, die als Verursacher von Allergien eine gesundheitsschädliche Wirkung haben können. Hinzu kommen die Stoffe, die durch den Menschen künstlich in die Luft eingetragen werden. Sie können sowohl gasförmig in der Luft gelöst als auch fest oder flüssig sein.

Die Abluft und die Abgase von Industrieanlagen, die gasförmigen *Emissionen*, kann man im Prinzip so reinigen, daß ihre Zusammensetzung derjenigen der natürlichen Umgebungsluft weitgehend entspricht. Ein erhöhter *Kohlendioxid*- und ein entsprechend gesenkter Sauerstoffgehalt ist bei Verbrennungsvorgängen allerdings zwangsläufig und kann durch nachgeschaltete Anlagen nicht mit vernünftigem Aufwand korrigiert werden. Inwieweit künstlich erzeugtes Kohlendioxid, CO_2 , als *Treibhausgas* zu geringfügiger, aber ökologisch verheeren-

Tab. 1-1: Zusammensetzung der trockenen Atmosphäre in der Nähe der Erdoberfläche (Bezugsjahr 1992), nach Bliefert [1.4].

Bestandteil	Formel	Volumenanteil
Stickstoff	N ₂	78,084 %
Sauerstoff	O ₂	20,946 %
Argon	Ar	0,934 %
Spurengase (gesamt)		0,036 %
Kohlendioxid	CO ₂	354 ppm ^{b)}
Neon	Ne	18,18 ppm
Helium	He	5,24 ppm
Methan	CH ₄	1,7 ... 1,8 ppm ^{c)}
Krypton	Kr	1,14 ppm
Wasserstoff	H ₂	0,5 ppm
Distickstoffoxid	N ₂ O	0,3 ppm ^{d)}
Xenon	Xe	87 ppb
Kohlenmonoxid ^{a)}	CO	30 ... 250 ppb
Ozon ^{a)}	O ₃	10 ... 100 ppb ^{e)}
Stickstoffdioxid ^{a)}	NO ₂	10 ... 100 ppb
Stickstoffoxid ^{a)}	NO	5 ... 100 ppb
Schwefeldioxid ^{a)}	SO ₂	< 1 ... 50 ppb
Ammoniak	NH ₃	0,1 ... 1 ppb
Formaldehyd ^{a)}	HCHO	0,1 ... 1 ppb
Chlormethan	CH ₃ Cl	620 ppt
Dichlordifluormethan (R12)	CF ₂ Cl ₂	480 ppt ^{f)}
Kohlenoxidsulfid	COS	400 ... 600 ppt
Trichlorfluormethan (R11)	CFCl ₃	280 ppt ^{f)}
Methylchloroform	CH ₃ CCl ₃	130 ppt
Tetrachlorkohlenstoff	CCl ₄	100 ... 200 ppt
Tetrafluormethan	CF ₄	67 ppt
Salpetersäure ^{a)}	HNO ₃	50 ... 1000 ppt
Schwefelkohlenstoff	CS ₂	20 ... 300 ppt
Dimethylsulfid	CH ₃ SCH ₃	20 ... 300 ppt
Peroxyacetylnitrat (PAN)	CH ₃ C(O)O ₂ NO ₂	10 ... 500 ppt
Methylmercaptan	CH ₃ SH	10 ... 400 ppt
Perhydroxyl-Radikal	HO ₂	4 ppt
Schwefelhexafluorid	SF ₆	0,5 ppt
Hydroxyl-Radikal	OH	0,04 ppt
Wasserstoffperoxid	H ₂ O ₂	bis 5 ppt
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	bis 0,5 ppt

^{a)} Spurengase mit schwankenden Volumenanteilen.

^{b)} Relativer Anstieg zur Zeit 0,3 ... 0,4 % im Jahr; Gehalt 1994: 357 ppm.

^{c)} Relativer Anstieg zur Zeit 1,0 % im Jahr.

^{d)} Relativer Anstieg zur Zeit ca. 0,2 ... 0,3 % im Jahr.

^{e)} Relativer jährlicher Anstieg zur Zeit 0,7 % in der Troposphäre;

relative jährliche Abnahme 0,3 ... 0,4 % in der Stratosphäre.

^{f)} Relativer jährlicher Anstieg der FCKW zur Zeit ca. 5 %.

der Erwärmung der Erdatmosphäre führt, ist umstritten. Meßtechnisch erwiesen sind sowohl die allmähliche Erwärmung als auch der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre seit Beginn der Industrialisierung [1.8]. Ein Kausalzusammenhang ist damit zwar naheliegend, aber nicht bewiesen. Das Klima ändert sich ständig, und die derzeitige Erwärmung kann auch ein Zufall oder durch Vorgänge in der Sonne verursacht sein. Die Entwicklung der Sonnenfleckenaktivität deutet darauf hin [1.9]. Als Folge löst sich weniger Kohlendioxid in den Ozeanen (siehe auch Abschnitt 4.1) [1.10, 1.11]. Verfahren zur CO₂-Begrenzung zielen fast immer darauf ab, Verbrennungsprozesse entweder zu optimieren oder zu umgehen [1.12], und werden in diesem Buch nicht diskutiert. Zur Thematik anderer Treibhausgase, vor allem des Methans, CH₄, sei auf Förstner [1.13] und Bliefert [1.4] verwiesen.

In der Regel verzichtet man aus wirtschaftlichen Überlegungen darauf, die anderen künstlich erzeugten Begleitstoffe in Abgasen möglichst vollständig zu entfernen, sondern strebt lediglich an, bestimmte gesetzlich vorgegebene Grenzwerte für die Menge und die Konzentration der Schadstoffe in der Abluft zu unterschreiten, also die *Emissionen* zu begrenzen. Das eigentliche Ziel ist, daß die Umgebungsluft auch nach dem Einleiten der Abluft keine ökologisch oder gesundheitlich bedenklichen Schadstoffkonzentrationen enthält, die *Immissionen* also bestimmte Grenzwerte unterschreiten. Diese sind durch Richtlinien festgelegt (siehe Abschnitt 1.2 und Kapitel 6). Die gesundheitlichen Folgen von Schadstoffimmissionen sind weitgehend erforscht [1.14 – 1.18]. Sie sind in der Regel weniger bedeutsam als die des Rauchens [1.19]. Bei der Bewertung von Abgasen spielt der Geruch – er wird *olfaktometrisch* [1.20] mit der menschlichen Nase untersucht – eine Rolle, seltener die Färbung durch fein dispergierte Partikel. Sie werden unabhängig davon, ob sie fest oder flüssig sind, als *Aerosole* bezeichnet (siehe auch Abschnitt 4.1.2, Rauchgasentschwefelung). Anders als in der Umwelt ist die Situation in Innenräumen. Hier kann es zu erheblichen lokalen Anreicherungen kommen [1.21, 1.22]. Zu Schadstoffen und deren Wirkung am Arbeitsplatz gibt es zahlreiche Untersuchungen [1.23]. Die daraus hervorgehenden Grenzwerte [1.24] weichen von denen für die Umwelt deutlich nach oben ab (siehe auch Abschnitt 1.2).

In diesem Buch wird ausschließlich der *additive Umweltschutz*, die Beseitigung von bereits entstandenen Emissionen, diskutiert, in der Praxis vorzuziehen ist jedoch nach Möglichkeit der *produktionsintegrierte*. Hier lassen sich aber kaum Regeln angeben, sondern lediglich Beispiele diskutieren, und das in großer Zahl [1.24 – 1.26]. Entscheidend sind die besonderen Gegebenheiten des Einzelfalls. Nur teilweise lassen sich die Anwendungsfälle in Gruppen einteilen, für die generelle Aussagen getroffen werden können [1.27]. Einen allgemeinen Überblick über Probleme der Luftreinhaltung unter Berücksichtigung branchenspezifischer Besonderheiten bietet Baum [1.28]. Neben technischen sind bei der Luftreinhaltung vor allem

wirtschaftliche Beschränkungen zu beachten, aber auch die Tatsache, daß zurückgehaltene und somit wiedergewonnene Schadstoffe – richtig eingesetzt – oft auch Wertstoffe sind.

Für spezielle Fertigungsprozesse der Mikroelektronik wendet man die *Reinraumtechnik* an [1.29]. Hier wie auch für Klimaanlageanlagen wird die Zuluft von Aerosolen gereinigt. Dieses Thema gehört nicht zur Umwelttechnik und wird im folgenden nicht behandelt. Allerdings sind die in diesem Buch vorgestellten Verfahren zur Abscheidung fester Schadstoffe grundsätzlich – mit entsprechenden Auslegungsdaten – auch dort anwendbar.

1.2 Gesetzeslage und Grenzwerte

Das Umweltrecht ist geprägt durch eine Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen [1.30, 1.31], die zum größten Teil entweder speziell für den Abluftbereich gelten oder ihn mit betreffen.

Am wichtigsten ist in der Bundesrepublik Deutschland das *Bundes-Immissionsschutzgesetz* (BImSchG) von 1974, novelliert 1990, das neben den stofflichen Emissionen auch die Problemfelder *Schall* und *Erschütterungen* abdeckt [1.32]. Es gliedert sich in sieben Teile:

1. Allgemeine Vorschriften
2. Errichtung und Betrieb von Anlagen
3. Beschaffenheit von Anlagen, Stoffen, Erzeugnissen, Brennstoffen, Treibstoffen und Schmierstoffen
4. Beschaffenheit und Betrieb von Fahrzeugen, Bau und Änderung von Straßen und Schienenwegen
5. Überwachung der Luftverunreinigung im Bundesgebiet, Luftreinhaltepläne und Lärm-minderungspläne
6. Gemeinsame Vorschriften
7. Schlußvorschriften

Zum BImSchG existieren 26 Rechtsverordnungen des Bundes, *Bundes-Immissionsschutzverordnungen* (BImSchV), zu folgenden Themen:

1. Kleinf Feuerungsanlagen
2. Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe

3. Schwefelgehalt von leichtem Heizöl
4. Genehmigungsbedürftige Anlagen (detaillierte Aufzählung)
5. Immissionsschutz- und Störfallbeauftragte
6. ./ (existiert nicht mehr)
7. Holzstaub
8. Rasenmäherlärm
9. Genehmigungsverfahren
10. Beschaffenheit von Kraftstoffen
11. Emissionserklärung (seitens des Betreibers)
12. Störfälle
13. Großfeuerungsanlagen (Kraftwerke)
14. Militärische Anlagen
15. Baumaschinenlärm
16. Verkehrslärm
17. Abfälle (siehe auch [1.33])
18. Sportanlagenlärm
19. Chlor- und Bromverbindungen als Kraftstoffzusatz
20. Kohlenwasserstoffemissionen beim Umfüllen und Lagern von Ottokraftstoffen
21. Kohlenwasserstoffemissionen beim Betanken von Kraftfahrzeugen
22. Immissionswerte (Höchstzulässige Werte und Meßverfahren)
23. Konzentrationswerte
24. Schallschutzmaßnahmen an Verkehrswegen
25. Emissionen aus der Titandioxid-Industrie
26. Elektromagnetische Felder
27. Anlagen zur Feuerbestattung und Änderung der 4. BImSchV

Näheres regelt auch die *Technische Anleitung Luft* (kurz: TA Luft) mit konkreten Vorgaben für die Genehmigungs- und Überwachungsbehörden. Sie ist älter als das BImSchG, gilt aber nach § 48 BImSchG als diesem untergeordnete Verwaltungsvorschrift (siehe auch BImSchG Teil 6, gemeinsame Vorschriften). Die TA Luft gibt konkrete Grenzwerte an, die für genehmigungspflichtige Anlagen nach der 4. BImSchV verbindlich sind.

Ergänzt und interpretiert werden die gesetzlichen Bestimmungen durch Gerichtsurteile, die ebenfalls das Recht prägen können. Ein bekanntes Beispiel ist das Verbot, offene Kamine im privaten Bereich häufiger als viermal monatlich zu betreiben. Das Bundes-Immissionsschutzgesetz sagt dazu direkt nichts aus. Näheres wird durch die 1. BImSchV oder *Kleinfeue-*