

Detlev Möller

Luft

Detlev Möller

Luft

Chemie · Physik · Biologie

Reinhaltung · Recht



Walter de Gruyter
Berlin New York 2003

Autor

Univ.-Prof. Dr. rer.nat.habil. Detlev Möller
Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik
Lehrstuhl Luftchemie und Luftreinhaltung
Postfach 10 13 44
03104 Cottbus

unter Beteiligung von

Dr. rer.nat. Karin Acker, BTU Cottbus, Lehrstuhl Luftchemie und Luftreinhaltung (Kap. 6.2)
Univ.-Prof. Dr. jur. Lothar Knopp, BTU Cottbus, Lehrstuhl für Staatsrecht, Verwaltungsrecht
und Umweltrecht (Kap. 8)
Dr.-Ing. Annette Rauterberg-Wulff, Umweltbundesamt, Berlin (Kap. 6)

Das Buch enthält 168 Abbildungen und 178 Tabellen.

ISBN 3-11-016431-0

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

⊗ Gedruckt auf säurefreiem Papier, das die US-ANSI-Norm über Haltbarkeit erfüllt.

© Copyright 2003 by Walter de Gruyter & Co.KG, D-10785 Berlin. – Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Printed in Germany.
Satz und Druck: Tutte Druckerei GmbH, Salzweg-Passau. Bindung: Lüderitz & Bauer GmbH, Berlin. Einbandgestaltung (unter Verwendung eines Wolkenmotivs von zefa/Scheibe): + mal-sy, Kommunikation und Gestaltung, Bremen.

Vorbemerkung

Die Entstehung dieses Buch beruht auf der Idee des Verlages, dem 1986 in 7. Auflage (1. Auflage 1943) erschienenen Buch „Wasser“ von *Karl Höll* ein vergleichbares Werk mit dem Titel „Luft“ folgen zu lassen. In einer gewissen Analogie zum *Wasser* können wir die *Luft* in Innenluft, Abluft, Außenluft, Bodenluft u.s.w. unterteilen. Im Unterschied zum *Wasser* stellt die Außenluft, die schlechthin als *Luft* bezeichnet wird, ein gänzlich dominierendes Reservoir dar. Diese *Luft* ist ausschließlicher Gegenstand des vorliegenden Werkes. Behandelt werden die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Luft in ihrer Wechselwirkung mit biogenen und abiotischen Prozessen der Biosphäre und Geosphäre, aber auch technologischen Prozessen sowie rechtliche Aspekte der Luftqualität.

Bereits in mittelalterlichen Städten hatte man erkannt, dass sich durch technische Prozesse (Färben, Gerben, Verbrennen) die Luftqualität verschlechterte und Maßnahmen ergriffen, diese technologischen Prozesse örtlich von der Wohnumwelt zu entfernen. Aus historischen Berichten geht hervor, dass die städtische Luftqualität im Mittelalter wesentlich schlechter gewesen sein muss als noch vor 30 oder 50 Jahren. Schwermetalle wurden möglicherweise bereits in der Antike weiträumig über die Luft verteilt. Eine regionale und zunehmend globale Verschlechterung der Luftqualität wird aber erst seit den 1940er Jahren registriert und führte seit Beginn der 1950er Jahre zu einem extensiven Studium der Wirkungen von Luftbeimengungen, ihrer Ursachen und Quellen sowie zur Entwicklung der *Luftreinhaltung*.

Luftreinhaltung wird in diesem Buch als *Management* der Luftverschmutzung aufgefasst. Luftverschmutzung ist ein Ausdruck für die anthropogene Änderung der chemischen Zusammensetzung der Luft. Das ist eine Tatsache bzw. ein Sachbestand, den es zu erfassen und zu bewerten gilt. Eine andere Frage ist die nach dem aus der Luftverschmutzung sich ergebenden Problem. Das Problem kann nur aus einer resultierenden Wirkung, die einen individuellen und/oder gesellschaftlichen Interessenkonflikt zur Folge hat, charakterisiert werden. Erst dann leiten sich Maßnahmen im Sinne einer Zielgröße ab, beispielsweise Abluftreinigung. Ein Grundanliegen dieses Buches ist es, den Leser an diese Problematik komplex und kritisch heranzuführen. Es kann deshalb auch nicht auf eine Darstellung naturwissenschaftlicher Grundlagen, im Wesentlichen chemische und physikalische Gesetzmäßigkeiten zur Beschreibung der Eigenschaften der Luft verzichtet werden.

Der Charakter des vorliegenden Werkes ist als „Handbuch“ zu bezeichnen. Zu einigen Teilgebieten, wie Abluftreinigung, Immissionsschutzrecht, Physik und Chemie der Atmosphäre existiert eine große Anzahl an Büchern, angefangen vom Lehrbuch bis hin zur Monographie. Es fehlt jedoch – nicht nur im deutschsprachigen Raum – ein zusammenfassendes Werk, das sowohl für den „Einsteiger“ als auch den „Spezialisten“ einen weitgehenden Überblick über die mit der *Luft* zusammenhängenden Probleme bietet. Das vorliegende Buch möge daher nicht nur als Handbuch sondern auch im Sinne eines Nachschlagewerkes *und* Lehrbuches diese Lücke

schließen und dem Leser helfen, Probleme zu artikulieren und Fakten zu liefern.

Das Buch ist aus der Sicht eines Chemikers geschrieben, der inzwischen mehr als 25 Jahre auf dem Gebiet der Luftchemie arbeitet und seit 15 Jahren Vorlesungen zur *Luft* gibt. Dennoch ist dem Autor bewusst, dass manche aktuelle Erkenntnisse fehlen, ihm womöglich nicht einmal bekannt sind sowie nicht alle Gebiete der *Luft* mit der vielleicht erwarteten Tiefe behandelt wurden. Mein Anliegen ist es vielmehr, die Komplexität systematisch darzustellen und dem Leser damit ein problemorientiertes Eindringen in das Thema gemäß dem Zyklus *Untersuchung – Beurteilung – Chemie – Physik – Biologie – Luftreinhaltung* auf der Grundlage von Erkenntnissen und Zusammenhängen zu ermöglichen.

Mein besonderer Dank gilt den Mitarbeitern meines Lehrstuhles, insbesondere Dr. Karin Acker und Dr. Wolfgang Wieprecht, welche mir nicht nur kritische Hinweise und bei jeder Anfrage sofort Messdaten aus unserem Archiv gaben sondern trotz zahlreicher laufender wissenschaftlicher Projekte mein häufiges Zurückziehen vom Tagesgeschehen respektierten, um das Manuskript zu erstellen. Frau Dr. Acker (Spurenstoffanalytik mit Denudern) hat das Kapitel zur Qualitätssicherung geschrieben (Kap. 6.2) und Herr Dr. Wieprecht (Cranox-System für NO, NO_x, NO_y; H₂O₂ u. a.), Frau Dr. Renate Auel (Ionenchromatographie), Herr Dr. Rolf Fabian (Ozon-Lidar Elight 510M), Herr Dipl.-Ing. Dieter Kalaß (Sodar, Ceilometer, Meteorologiemesstechnik), Herr Dr. Hans-Jörg Prümke (organische Analytik mit GC-MS, airmoVOC 2020) sowie Herr Jürgen Hofmeister haben mir ihre Erfahrungen „überlassen“ aus mehr als 20 Messkampagnen, an denen meine Gruppe teilnahm. Meinem langjährigen Mitarbeiter Dr. Günther Mauersberger (mathematische Modellierung wolkenchemischer Prozesse) danke ich ganz besonders für die kritische Durchsicht von Teilen des Manuskriptes sowie die Überlassung des Verweilzeitkonzepts. Frau Dr. Anette Rauterberg-Wulff (Umweltbundesamt Berlin) hatte die Aufgabe übernommen, das Manuskript akribisch Korrektur zu lesen und mir dabei viele Hinweise gegeben, wie es noch zu verbessern ist – dafür vielen Dank! Meinem Sohn Stefan danke ich für das kritische Lesen und die vielen Hinweise aus der Sicht eines Physikstudenten und meinem Sohn Andreas danke ich für das Erstellen vieler Abbildungen.

Mein besonderer Dank gilt aber auch dem Verlagshaus *Walter de Gruyter*, welches die Idee zu diesem Buch entwickelte und mich als Autor fragte, ob ich ein Buch *Luft* schreiben wolle. Nun hoffe ich, dass es Studenten sowie den bereits in der Praxis Tätigen ein nützliches Buch sein möge bei der Bewertung, Bearbeitung und Lösung mannigfaltiger Umweltprobleme, die alle in einem näheren oder weiteren Zusammenhang mit der Luft stehen.

Berlin, Juli 2003

Detlev Möller

Inhalt

E	Einführung	1
1	Herkunft von Luftspurenstoffen	9
1.0	Historische Untersuchungen zur Luft	9
1.1	Evolution und Zusammensetzung der natürlichen Atmosphäre	12
1.1.1	Zusammensetzung der natürlichen Atmosphäre; Konzentrationsmaße	12
1.1.2	Entstehung und Veränderung der Atmosphäre	16
1.1.3	Entstehung des Lebens, Biosphäre-Atmosphäre-Kopplung	19
1.1.4	Vergangenes Klima (Paleoklima)	23
1.2	Natürliche Quellen von Luftbestandteilen	28
1.2.1	Biogene Quellen	31
1.2.1.1	Kreisläufe: Pflanzen, Tiere, Boden, Ozean	31
1.2.1.2	Stickstoffverbindungen	36
1.2.1.3	Schwefelverbindungen	40
1.2.1.4	Kohlenmonoxid (CO)	44
1.2.1.5	Methan (CH ₄)	45
1.2.1.6	Andere organische Verbindungen (NMVOC)	46
1.2.2	Geogene Quellen	50
1.2.2.1	Bodenstaub	51
1.2.2.2	Seesalz	54
1.2.2.3	Vulkanismus	56
1.2.2.4	Biomasseverbrennung	60
1.2.2.5	Gewitter	63
1.2.3	Sekundäre Quellen	63
1.2.4	Zusammenfassung globaler Emissionen	64
1.3	Belastete Luft	67
1.3.1	Historische Aspekte	70
1.3.2	Übersicht der anthropogenen Quellen von Luftbestandteilen	78
1.3.2.1	Chemische Prozesse (Industrie, Verkehr, Kommunalbereich)	79
1.3.2.2	Biologische Prozesse (Landwirtschaft, Deponie, Kommunalbereich)	87
1.3.3	Trends	89
1.3.4	Zusammenfassung globaler Emissionen	102
1.3.5	Zukünftiges Klima	105
2	Physikalisch-chemische Grundlagen der Luft	109
2.0	Einführung	109
2.1	Phänomenologie der Luft	112
2.1.1	Der Aufbau der Atmosphäre	112
2.1.1.1	Skalierung	112
2.1.1.2	Der vertikale Aufbau der Atmosphäre	115

XVIII Inhalt

2.1.2	Die meteorologischen Elemente	119
2.1.2.1	Der Atmosphärendruck	120
2.1.2.2	Die Lufttemperatur	122
2.1.2.3	Die Luftfeuchtigkeit	123
2.1.2.4	Die Windgeschwindigkeit	124
2.1.2.5	Die Strahlung	125
2.1.3	Wolken, Nebel und Niederschlag	131
2.1.3.1	Wolken	133
2.1.3.2	Nebel	134
2.1.3.3	Niederschlag	136
2.1.3.4	Tropfencharakteristik (Anzahl, Volumen, Oberfläche)	137
2.1.4	Luftmassen	140
2.2	Optik der Atmosphäre (Strahlung)	141
2.2.1	Strahlungsgesetze	142
2.2.1.1	Wärmestrahlung und thermisches Gleichgewicht	142
2.2.1.2	Das <i>Plancksche</i> Strahlungsgesetz	142
2.2.1.3	Das <i>Stefan-Boltzmann</i> -Gesetz	144
2.2.2	Grundlagen der Strahlungsabsorption	146
2.2.3	Solare und terrestrische Strahlung; Strahlungsbilanz	148
2.2.4	Zur Energiebilanz der Erde – Energiequellen für die Menschheit	152
2.3	Mechanik der Atmosphäre	153
2.3.1	Die wirksamen atmosphärischen Kräfte	155
2.3.2	Strömungen	157
2.3.2.1	Beschreibung von Strömung	157
2.3.2.2	Die laminare und turbulente Strömung	158
2.3.3	Kinetische Gastheorie	161
2.3.3.1	Einführung und Grundgleichung	161
2.3.3.2	Die mittlere freie Weglänge	163
2.3.3.3	Die <i>Brown'sche</i> Molekularbewegung	164
2.3.4	Diffusion	165
2.3.5	Aerosolmechanik (Partikeldynamik)	168
2.4	Thermodynamik der Atmosphäre	171
2.4.1	Eigenschaften der Gase (ideale Gase)	172
2.4.2	Zustandsänderungen und erster Hauptsatz der Thermodynamik	174
2.4.3	Thermochemie	176
2.4.4	Entropie und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	178
2.4.5	Das chemische Potenzial	181
2.4.6	Eigenschaften von Flüssigkeiten (Tropfen)	182
2.4.6.1	Dampfdruck (<i>Kelvin</i> -Gleichung)	184
2.4.6.2	Oberflächenspannung	187
2.4.6.3	Lösungen	189
2.4.7	Gleichgewichte	196
2.4.7.1	Gleichgewichtskonstante	196
2.4.7.2	Phasengleichgewichte (<i>Henry</i> -Gleichgewicht)	198
2.4.7.3	Protolysegleichgewichte	200
2.5	Reaktionskinetik	203
2.5.1	Kinetische Grundgleichungen	204
2.5.2	Die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	207
2.5.3	Radikale	210

2.5.4	Photochemie	212
2.5.4.1	Elektronische Struktur von Atomen und Molekülen	212
2.5.4.2	Angeregte Zustände von Atomen und Molekülen sowie Übergänge	216
2.5.4.3	Kinetik der Photolyse	219
2.5.5	Katalytische Reaktionen	224
2.5.6	Verweilzeit atmosphärischer Spurenstoffe (Teil 1)	225
2.6	Aggregatzustände und Phasenübergänge	227
2.6.1	Eigenschaften fester Partikel (atmosphärisches Aerosol)	227
2.6.1.1	Größenverteilungen	229
2.6.1.2	Partikelbildung (homogene Nukleation; <i>gas-to-particle</i> Umwandlung)	233
2.6.1.3	Hygroskopizität (Bildung von Wolkenkondensationskernen)	235
2.6.1.4	Tropfenbildung (heterogene Nukleation)	237
2.6.2	Eigenschaften von Oberflächen	238
2.6.2.1	Adsorption	238
2.6.2.2	Oberflächenaktive Substanzen	240
2.6.3	Multiphasenprozesse	242
2.6.3.1	Stoffübergang zwischen Gasphase und Teilchenoberfläche	242
2.6.3.2	Kinetik eines Oberflächenprozesses	246
2.6.3.3	Stoffübergang Gas-Tropfen mit Flüssigphasenreaktion	248
3	Deposition von Luftspurenstoffen	255
3.0	Einführung	255
3.1	Trockene Deposition	258
3.1.1	Mechanismus der trockenen Deposition	258
3.1.2	Widerstandsmodell der trockenen Deposition	261
3.2	Nasse Deposition	266
3.3	Deposition durch Impaktion	269
3.4	Daten zur trockenen und nassen Deposition	271
3.5	Verweilzeit atmosphärischer Spurenstoffe (Teil 2)	276
4	Troposphärenchemie	281
4.0	Einführung	281
4.1	Gasphasenchemie	286
4.1.1	Oxidantienchemie bei Abwesenheit von Spurenstoffen	288
4.1.2	Oxidantienchemie bei Anwesenheit von NO _x , aber Abwesenheit von CO und VOC	292
4.1.3	Oxidantienchemie bei Anwesenheit von CO und VOC, aber Abwesenheit von NO _x	294
4.1.4	Oxidantienchemie bei Anwesenheit von NO _x , CO und VOC	296
4.1.5	Weitere photochemisch wichtige Reaktionen	298
4.1.6	NO _x -NO _y -Chemie	300
4.1.7	Chemie organischer Verbindungen	306

4.1.7.1	Alkane, Aldehyde, Alkohole und Carbonsäuren	307
4.1.7.2	Alkene, Isopren und Terpene	309
4.1.7.3	Aromatische Verbindungen	314
4.1.7.4	Oxidationspotenzial	315
4.1.8	S-Chemie	316
4.1.8.1	Schwefeldioxid	317
4.1.8.2	Reduzierte Schwefelverbindungen	318
4.2	Azidität	324
4.2.1	Theorie der Säuren und Basen	325
4.2.2	Das Konzept der Azidität in der Flüssigphase	329
4.2.3	Zur Rolle von Kohlendioxid und Karbonat	332
4.2.4	Aziditätspotenzial	334
4.3	Flüssigphasenchemie	336
4.3.1	Rolle von Übergangsmetallionen	337
4.3.2	Oxidantienchemie	339
4.3.3	Flüssigphasenchemie von S(IV)	345
4.3.3.1	S(IV)-Oxidation durch H ₂ O ₂ und organische Peroxide (ROOH)	348
4.3.3.2	S(IV)-Oxidation durch O ₃	350
4.3.3.3	S(IV)-Oxidation durch Radikale (OH, NO ₃) und TMI	352
4.3.4	Flüssigphasenchemie von N-Verbindungen	355
4.3.5	Organische Verbindungen	356
4.4	Chemie in Wolken, Nebel und Niederschlag (Multiphasenchemie)	357
4.4.1	Multiphasenchemie von Ozon	360
4.4.2	Multiphasenchemie von Wasserstoffperoxid	366
4.4.3	Multiphasenchemie von Schwefeldioxid	372
4.4.4	Multiphasenchemie von Halogenverbindungen	377
4.4.4.1	Chlorid (Seesalz)	378
4.4.4.2	Sonstige Halogenverbindungen	383
4.4.5	Chemische Zusammensetzung von Niederschlägen	388
4.4.5.1	Trends der Azidität	390
4.4.5.2	Niederschlagschemie am Beispiel der Station Seehausen	393
4.4.5.3	Chemische Zusammensetzung von Niederschlag in verschiedenen Regionen der Erde	400
4.4.6	Chemische Zusammensetzung von Wolken	405
4.4.6.1	Brocken-Wolkenchemie	407
4.4.6.2	Chemische Zusammensetzung von Wolken in verschiedenen Regionen der Erde	415
4.4.6.3	Wolkenchemische Untersuchungen in Europa	416
4.4.7	Chemische Zusammensetzung von Nebel	417
5	Stratosphärenchemie	421
5.0	Einführung	421
5.1	O _x -Chemie	423
5.2	C—H—O-Chemie	426
5.3	N—O-Chemie	429
5.4	Chemie der Halogenverbindungen	430

5.5	S-Chemie	432
5.6	Multiphasenchemie („Ozonloch)	433
5.7	Trends der stratosphärischen Ozonkonzentration	437
6	Messung von Luftspurenstoffen	443
6.1	Allgemeine Prinzipien	444
6.2	Planung von Immissionsmessungen	446
6.2.1	Analyse des Vorwissens	446
6.2.2	Was soll gemessen werden?	447
6.2.3	Auswahl von Messstandorten	450
6.2.3.1	Auswahl von Hintergrundmessstandorten	450
6.2.3.2	Auswahl von Messstandorten in urbanen Ballungsgebieten aus der Sicht der Lufthygiene	453
6.2.3.3	Auswahl von Messstellen im Rahmen der ökosystembezogenen Wirkungs- forschung	454
6.2.4	Messzeitraum und zeitliche Auflösung	455
6.2.5	Auswahl der Messtechnik	457
6.3	Verfahrenskenngrößen	458
6.4	Qualitätssicherung	460
6.4.1	Definition und Grundlagen	461
6.4.2	Durchführung der Qualitätssicherung	462
6.4.2.1	Laborinterne Maßnahmen zur Qualitätssicherung	462
6.4.2.2	Externe Maßnahmen zur Qualitätssicherung	465
6.4.2.3	Bekanntgabe nach § 26 Bundesimmissionsschutzgesetz	465
6.4.2.4	Akkreditierung nach DIN EN 45001	466
6.4.2.5	Ringversuche	467
6.4.3	Qualitätssicherung in der Atmosphärenforschung	467
6.5	Auswertung von Messwerten	469
6.6	Prinzipien der Luftanalytik	473
6.6.1	Probenahme von Luftspurenstoffen	475
6.6.1.1	Passive Probenahmeverfahren	475
6.6.1.2	Verfahren mit aktiver Probenahme	476
6.6.1.3	Probenahme gasförmiger Spurenstoffe	478
6.6.1.4	Probenahme von Partikeln	481
6.6.1.5	Probenahme mit Gasdiffusionsabscheidern (Denudern)	484
6.6.1.6	Probenahme von Niederschlägen und Wolken	489
6.6.2	Messmethoden	491
6.6.2.1	Methoden zur kontinuierlichen Messung von Gasen	491
6.6.2.2	Chromatographische Verfahren	492
6.6.2.3	Bestimmung von Metallen und Halbmetallen in Partikeln	494
6.6.3	Fernmessverfahren	495

7	Luftspurenstoffe und Luftreinigung	499
7.0	Einleitung: Problemstellung	499
7.1	Wirkungsprinzipien von Luftspurenstoffen	505
7.1.1	Atmosphärische Wirkungspotenziale	505
7.1.2	Prinzipien toxikologischer Wirkungen	510
7.1.2.1	Oxidativer Stress	510
7.1.2.2	Vegetationsschäden	511
7.1.2.3	Gesundheitsschäden (Mensch)	515
7.1.2.4	Neuartige Wirkung durch das Nitradikal (NO_3)	520
7.1.3	Klimaänderung	522
7.1.3.1	Einfluss der ultravioletten Strahlung (UV-B)	524
7.1.3.2	Abkühlung durch streuendes Aerosol	527
7.1.3.3	Erwärmung durch absorbierende Gase (Treibhauseffekt)	530
7.2	Luftreinhaltung	537
7.2.1	Prinzipien der Luftreinhaltung	537
7.2.2	Landwirtschaft	540
7.2.3	Energiewirtschaft (stationäre Verbrennung fossiler Rohstoffe)	540
7.2.4	Transportsektor (mobile Verbrennungsquellen)	544
7.3	Luftspurenstoffe	546
7.3.1	Schwefeldioxid	548
7.3.1.1	Historisches und Bedeutung	550
7.3.1.2	Quellen	555
7.3.1.3	Immission	560
7.3.2	Stickstoffoxide	566
7.3.2.1	Historisches und Bedeutung	566
7.3.2.2	NO-Bildung und -emission	567
7.3.2.3	Immission	572
7.3.3	Ammoniak	575
7.3.3.1	Historisches und Bedeutung	576
7.3.3.2	Quellen	577
7.3.3.3	Immission	581
7.3.4	Ozon	582
7.3.4.1	Das Problem	582
7.3.4.2	Historisches	584
7.3.4.3	Der historische Anstieg des Ozons in der Troposphäre	587
7.3.4.4	Höhenabhängigkeit der Ozonkonzentration	593
7.3.4.5	Jahresgang der Ozonkonzentration und gegenwärtiger Trend	595
7.3.4.6	Tagesgang der Ozonkonzentration	599
7.3.4.7	Der Effekt von Wolken auf die Ozonkonzentration	603
7.3.4.8	Photochemische Bildung von Ozon und limitierende Parameter	605
7.3.4.9	Ozon-Senken	609
7.3.4.10	Ozon-Budget	613
7.3.4.11	Schlussfolgerungen	618
7.3.5	Wasserstoffperoxid	620
7.3.5.1	Historisches	620
7.3.5.2	Konzentration und deren zeitliche Variabilität	622
7.3.5.3	Budget: Bildung und Abbau von H_2O_2	625
7.3.5.4	Langzeitverhalten (Trend)	628

8	Rechtliche Aspekte der Luftreinhaltung	635
8.1	Immissionsschutzrecht	635
8.1.1	Rechtsquellen	635
8.1.1.1	Europarecht und Internationales Recht	636
8.1.1.2	Nationales Recht	640
8.2	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)	645
8.2.1	Zielsetzung, Gesetzeszweck und Geltungsbereich	645
8.2.2	Grundbegriffe und TA Luft	647
8.2.2.1	Emissions- und Immissionsbegriff	647
8.2.2.2	Luftverunreinigungen und TA Luft	647
8.2.2.3	Schädliche Umwelteinwirkungen	649
8.2.2.4	Gefahren, erhebliche Nachteile und Belästigungen bei Luftverunreinigungen	650
8.2.2.5	Nachbarschaft	650
8.2.3	Anlagenbezogener Immissionsschutz	651
8.2.4	Produktbezogener Immissionsschutz	652
8.2.5	Verkehrsbezogener Immissionsschutz	653
8.2.6	Gebietsbezogener Immissionsschutz	655
8.3	Schlussfolgerungen	658
	Anhang 1: Gasphasenchemischer Mechanismus (RACM)	659
	Anhang 2: Flüssigphasenchemischer Mechanismus	671
	Literatur	683
	Namenregister	729
	Sachregister	731