

Günter Baumbach

Luftreinhaltung

Entstehung, Ausbreitung und Wirkung
von Luftverunreinigungen –
Meßtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften

Dritte Auflage

Unter Mitarbeit von
K. Baumann, F. Dröscher,
H. Gross und B. Steisslinger

Mit 232 Abbildungen

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo
Hong Kong Barcelona
Budapest

Inhalt

1	Allgemeiner Überblick	1
1.1	Reine Luft und Luftverunreinigungen	1
1.2	Geschichtlicher Überblick (F. Dröscher)	2
1.3	Begriffserläuterungen	10
1.4	Literatur	13
2	Entstehung und Quellen von Luftverunreinigungen	14
2.1	Entstehung von Schadstoff-Emissionen bei Verbrennungsprozessen	14
2.1.1	Produkte vollständiger und unvollständiger Verbrennung	14
2.1.1.1	Kohlenmonoxid	17
2.1.1.2	Kohlenwasserstoffe	18
2.1.1.3	Ruß	23
2.1.1.4	Kohlenwasserstoff-Emissionen bei verschiedenen Verbrennungsprozessen	24
2.1.2	Schwefelverbindungen	24
2.1.2.1	Schwefel in der Kohle	25
2.1.2.2	Schwefel im Heizöl	26
2.1.2.3	Schwefel im Erdgas	27
2.1.2.4	Gegenüberstellung der Schwefelgehalte verschiedener Brennstoffe	27
2.1.2.5	Produkte bei der Verbrennung schwefelhaltiger Brennstoffe	27
2.1.3	Stickstoffoxide	30
2.1.3.1	Stickstoffoxid-Entstehung	30
2.1.3.2	Stickstoffoxid-Emissionen bei verschiedenen Verbrennungsprozessen	34
2.1.4	Partikel	36
2.1.4.1	Problem, Abhängigkeiten und Bestandteile	36
2.1.4.2	Ruß- und Partikelemissionen bei der Verfeuerung flüssiger Brennstoffe	37
2.1.4.3	Partikelemissionen bei industriellen Kohlefeuerungen	39
2.1.4.4	Partikelemissionen bei der Stückholzverbrennung in häuslichen Feuerstätten	42
2.1.5	Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane	45
2.1.5.1	Eigenschaften, Entstehung und Herkunft	45
2.1.5.2	Toxizität, Toxizitätsequivalente und Grenzwerte	47
2.1.5.3	Dioxin-Quellen	49
2.1.6	Kraftfahrzeugabgase	50
2.1.6.1	Einflüsse auf die Entstehung	50
2.1.6.2	Abgasemissionen in Fahrbetrieb	56
2.1.6.3	Entwicklung der Abgasemissionen der Kraftfahrzeuge	59
2.2	Quellen von Luftverunreinigungen	60
2.2.1	Schwefeloxide	60

X	Inhalt	
2.2.2	Stickstoffoxide	62
2.2.3	Kohlenmonoxid und organische Stoffe	64
2.2.4	Emissionen industrieller und gewerblicher Prozesse	68
2.3	Literatur	70
3	Luftverunreinigungen in der Atmosphäre	75
3.1	Meteorologische Einflüsse auf die Ausbreitung der Luftverunreinigungen	75
3.1.1	Wind	76
3.1.2	Turbulenz	76
3.1.3	Inversion	79
3.1.3.1	Arten von Inversionen	80
3.1.3.2	Entstehung von Inversionen	81
3.1.4	Mischungsschicht und Sperrschichten	83
3.1.5	Sperrschichten und Luftverunreinigungen – Beispiele für die Schadstoffausbreitung	87
3.1.5.1	Großräumige Verteilung von Luftverunreinigungen: SO ₂ -Ferntransporte	87
3.1.5.2	Kleinräumige Verteilungen von Luftverunreinigungen in Mittelgebirgstälern	92
3.2	Chemische Umwandlungen von Schadstoffen in der Atmosphäre	96
3.2.1	Allgemeine Betrachtungen	97
3.2.1.1	Atmosphäre und Luftverunreinigungen	97
3.2.1.2	Berechnung von Reaktionsraten	101
3.2.2	Oxidation von SO ₂	101
3.2.2.1	SO ₂ -Oxidation in der Gasphase	102
3.2.2.2	SO ₂ -Umwandlung in flüssiger Phase und an festen Teilchen	102
3.2.3	Reaktionen von Stickstoffoxiden in der Atmosphäre	106
3.2.3.1	NO-Oxidation und Ozonentstehung	107
3.2.3.2	Mitwirkung von Kohlenwasserstoffen bei der NO-Oxidation	111
3.2.3.3	NO ₂ -Oxidation	114
3.2.3.4	NO _x und saurer Regen	115
3.2.4	Die Rolle des Ozons in der Atmosphäre	115
3.2.4.1	Ozon in der Stratosphäre	115
3.2.4.2	Ozon in der Troposphäre	116
3.2.5	Kohlenstoffverbindungen	122
3.2.5.1	Organische Kohlenstoffverbindungen	122
3.2.5.2	Anorganische Kohlenstoffverbindungen	123
3.2.6	Partikel in der Atmosphäre	124
3.2.7	Niederschlagsinhaltsstoffe	124
3.3	Luftverunreinigungen in belasteten und weniger belasteten Gebieten (mit K. Baumann)	126
3.3.1	Schwefeldioxid	126
3.3.2	Stickstoffoxide	126
3.3.3	Ozon	129
3.3.4	Kohlenwasserstoffe und andere Spurengase	132
3.3.5	Staubinhaltsstoffe	133
3.4	Modellierung der Schadstoffausbreitung (B. Steisslinger)	134

3.4.1	Zielsetzung und Einsatzbereich von mathematisch-meteorologischen Simulationsmodellen Modellkonzeptionen	134
3.4.2	Modellkonzeptionen	135
3.4.2.1	Strömungs- und Turbulenzmodellierung	136
3.4.2.2	Modellierung der Schadstoffausbreitung	138
3.4.3	Berücksichtigung chemischer Umwandlungen in Ausbreitungsmodellen	144
3.4.4	Zusammenfassender Überblick über Modellkonzeptionen	144
3.5	Literatur	145
4	Wirkungen von Luftverunreinigungen (mit F. Dröscher)	150
4.1	Allgemeines	150
4.1.1	Das Spektrum der möglichen Schädigungen	150
4.1.2	Der Weg von Luftschadstoffen an ihre Wirkungsorte	151
4.2	Klimaveränderungen durch atmosphärische Spurenstoffe	152
4.2.1	Temperaturerhöhung	153
4.2.1.1	Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht	154
4.2.1.2	Treibhauseffekt Infrarotlicht-aktiver Gase	155
4.2.2	Temperaturniedrigung durch erhöhtes Staub- und Wolkenvorkommen	156
4.2.3	Schwierigkeiten der Prognose	157
4.3	Wirkungen auf Sachgüter	157
4.3.1	Mineralische Baustoffe	158
4.3.2	Metalle	160
4.3.3	Andere Materialien	161
4.4	Wirkungen auf die Vegetation	162
4.4.1	Pflanzenschädigung durch Luftverunreinigungen	164
4.4.1.1	Ermittlung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen	164
4.4.1.2	Wirkungsmechanismen und Schadbilder einzelner Luftschadstoffe . .	168
4.4.2	Waldschäden	169
4.4.2.1	Schadbilder	170
4.4.2.2	Angenommene Wirkungsmechanismen	172
4.5	Wirkungen auf die menschliche Gesundheit	175
4.5.1	Möglichkeiten und Schwierigkeiten bei der Erfassung der Schadwirkungen	176
4.5.2	Wege der Luftverunreinigungen im menschlichen Körper	178
4.5.3	Wirkungen der wichtigsten Luftschadstoffe	182
4.6	Grenzwerte	182
4.6.1	Immissionswerte der TA Luft	183
4.6.2	MIK-Werte des Vereins Deutscher Ingenieure	183
4.6.3	Smogalarm-Werte	186
4.6.4	MAK-Werte der Deutschen Forschungsgemeinschaft	186
4.7	Literatur	187
5	Meßtechniken zur Erfassung von Luftverunreinigungen	190
5.1	Allgemeine Kriterien	190
5.1.1	Einsatzgebiete der Meßtechnik	190
5.1.2	Diskontinuierliche und kontinuierliche Meßverfahren	190
5.1.3	Physikalisches und chemisches Meßprinzip	193

5.1.4	Unterschiedliche Anforderungen bei Emissions- und Immissionsmessungen	194
5.1.5	Zu erfassende Emissionskomponenten	195
5.1.6	Zu erfassende Immissionskomponenten	196
5.2	Meßverfahren für gasförmige Schadstoffe	198
5.2.1	Fotometrie	199
5.2.1.1	IR-Fotometer	201
5.2.1.2	UV-Fotometer	204
5.2.1.3	Langweg-Fotometrie	208
5.2.2	Kolorimetrie	209
5.2.3	UV-Fluoreszenz	209
5.2.4	Chemilumineszenz	210
5.2.4.1	NO _x -Messung	210
5.2.4.2	O ₃ -Messung	212
5.2.5	Flammen-Fotometrie	213
5.2.6	Flammen-Ionisation	213
5.2.7	Konduktometrie	215
5.2.8	Amperometrie	217
5.2.9	Coulometrie	218
5.2.10	Potentiometrie	219
5.2.10.1	pH-Messung	220
5.2.10.2	HF- und HCl-Messung mit ionensensitiven Elektroden	220
5.2.10.3	O ₂ -Messung mit dem Festkörperionenleiter Zirkondioxid	221
5.2.11	Paramagnetische Sauerstoffmessung und Messung der Wärmeleitfähigkeit	223
5.2.12	Handanalytische Meßverfahren	224
5.2.13	Chromatographische Verfahren	227
5.2.13.1	Gas-Chromatographie	227
5.2.13.2	Gas-Chromatographie/Massenspektrometrie	229
5.2.13.3	Hochdruckflüssigkeits- und Ionen-Chromatographie	230
5.2.13.4	Bestimmung von hochtoxischen organischen Verbindungen	213
5.2.14	Methode zur Geruchsstoffbestimmung- Olfaktometrie	234
5.3	Meßverfahren für staubförmige Luftverunreinigungen	236
5.3.1	Gravimetrische Staubgehaltsbestimmung an Abgasen	236
5.3.2	Laufende Registrierung der Abgas-Staubkonzentration	239
5.3.3	Bestimmung der Rußzahl von Feuerungsabgasen	242
5.3.4	Bestimmung der Korngrößenverteilung der emittierten Stäube	242
5.3.5	Messung der Staubniederschläge aus der Atmosphäre	245
5.3.6	Messung der Staubkonzentration der Luft	246
5.3.6.1	Diskontinuierlich arbeitende Filtergeräte	246
5.3.6.2	Automatisch registrierende Staubkonzentrations-Meßgeräte	250
5.3.7	Bestimmung von Staubinhaltsstoffen	252
5.4	Aufbau von Meßanlagen, Probenahmeverfahren und deren Einflüsse auf die Genauigkeit der Messungen	254
5.4.1	Emissionsmessungen an Feuerungs- und Prozeßanlagen	254
5.4.1.1	Ort der Probenahme	254
5.4.1.2	Aufbau des Meßplatzes – Probenahmesystem	256
5.4.1.3	Fehlermöglichkeiten bei der Probenahme	258

5.4.2	Emissionsmessungen an Kraftfahrzeugen	261
5.4.2.1	Abgasprobenahme und Messung nach der CVS-Methode	261
5.4.2.2	Unterschiedliche Fahrzyklen	262
5.4.3	Immissionsmessungen	264
5.4.3.1	Bedeutung der Lage der Meßstellen	264
5.4.3.2	Probenahmesysteme in Meßstationen	265
5.4.3.3	Aufbau von Immissionsmeßstationen – Beispiel einer Waldmeßstation	267
5.5	Kalibrierung bei Luftverunreinigungs-Messungen	270
5.5.1	Definitionen	270
5.5.2	Prüfgase	271
5.5.2.1	Statische Verfahren zur Prüfgasherstellung	271
5.5.2.2	Dynamische Verfahren – Mischen von Volumenströmen	272
5.5.2.3	Beispiel einer Prüfgasherstellung	272
5.5.2.4	Schwierigkeiten bei der Prüfgasherstellung	273
5.5.3	Bedeutung der Kalibrierung	274
5.6	Genauigkeit von Meßverfahren und Meßgeräten	274
5.6.1	Übersicht über Verfahrenskenngrößen	274
5.6.2	Linearität der Eichfunktion und Empfindlichkeit	279
5.6.3	Querempfindlichkeit	280
5.6.4	Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Meßverfahren durch Ringversuche	282
5.6.5	Fehlerbetrachtung am Beispiel einer vollständigen Emissionsmessung	284
5.7	Literatur	286
6	Auswertung von Luftverunreinigungs-Messungen	294
6.1	Bestimmung von Schadstoffemissionen	294
6.1.1	Ermittlung von Schadstoffemissionen aus Konzentrationsmessungen an Abgasen	294
6.1.1.1	Emissionsströme und Emissionsfaktoren	294
6.1.2	Berechnung von Schadstoffemissionen aus Brennstoffeigenschaften	296
6.1.2.1	Schwefeldioxid	296
6.1.2.2	Stickstoffoxide	297
6.1.2.3	Produkte unvollständiger Verbrennung	297
6.1.2.4	Schwermetallemissionen bei Ölfeuerungen	297
6.1.3	Erfassung der Schadstoff-Emissionen eines Gebietes in Emissionskatastern	298
6.1.3.1	Räumliche Schadstoffverteilung	298
6.1.3.2	Bestimmung der Schadstoff-Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs	299
6.1.3.3	Schadstoff-Emissionen von Hausheizungen und Kleingewerbe	301
6.1.3.4	Schadstoff-Emissionen von Industrie- und Gewerbeanlagen	301
6.1.3.5	Zusammengefaßte Darstellung der Jahresemissionen	303
6.1.3.6	Zeitliche Schadstoffverteilung	305
6.2	Auswertung und Darstellung von Schadstoff-Immissionsmessungen (mit K. Baumann)	307
6.2.1	Zeitliche Auflösung und Mittelwertbildung	307
6.2.2	Komprimierung und Darstellung von Meßdaten kontinuierlicher Messungen	310
6.2.2.1	Ungeglättete Monatsverläufe	310

XIV	Inhalt	
6.2.2.2	Mittelwertbildung für die Smogwarnung	310
6.2.2.3	Tagesgänge	310
6.2.2.4	Langfristige Jahresverläufe	313
6.2.3	Häufigkeitsverteilung	315
6.2.4	Flächenhafte Verteilung von Schadstoffen	318
6.2.4.1	Bestimmungsmethode und graphische Darstellung	318
6.2.4.2	Aussagekraft und Unsicherheit von Stichproben-Meßwerten	319
6.2.5	Methoden zur Untersuchung von Gesetzmäßigkeiten im Schadstoffaufkommen	322
6.2.5.1	Mittlere Tagesgänge	322
6.2.5.2	Korrelationsrechnungen	322
6.2.5.3	Schadstoffwindrosen	325
6.2.5.4	Abklingkurven	329
6.3	Literatur	330
7	Verfahren zur Emissionsminderung	334
7.1	Allgemeine Betrachtungen	334
7.1.1	Verfahrensumstellung	335
7.1.2	Emissionsminderung bei Feuerungsanlagen	337
7.1.2.1	Produkte unvollständiger Verbrennung	338
7.1.2.2	Staub	338
7.1.2.3	Stickstoffoxide	339
7.1.2.4	Schwefeldioxid	339
7.1.3	Wirksamkeit von Abgasreinigungsmaßnahmen	341
7.2	Verfahren zur Entstaubung von Abgasen (H. Gross)	343
7.2.1	Massenkraftentstauber	344
7.2.1.1	Trägheitskraftabscheider	345
7.2.1.2	Fliehkraftabscheider	346
7.2.2	Naßentstaubung	348
7.2.2.1	Grundlagen der Naßentstaubung	350
7.2.2.2	Bauarten von Naßabscheidern	353
7.2.3	Elektrische Staubabscheider	357
7.2.3.1	Verfahrensprinzip	357
7.2.3.2	Wirkungsweise	358
7.2.3.3	Abscheidegleichung	363
7.2.3.4	Bauarten	364
7.2.4	Filternde Entstauber	366
7.2.4.1	Schlauchfilter	367
7.2.4.2	Taschen- oder Rahmenfilter	371
7.3	Stickstoffoxidminderung bei Verbrennungsprozessen	371
7.3.1	Primärmaßnahmen bei Feuerungsanlagen	371
7.3.1.1	Verringerung des Luftüberschusses	372
7.3.1.2	Stufenverbrennung, Stufenmischbrenner und Oberluftdüsen	372
7.3.1.3	Geringe Luftvorwärmung	373
7.3.1.4	Verminderung der volumenspezifischen Brennraumbelastung	373
7.3.1.5	Rauchgas-Rückführung	375
7.3.1.6	NO _x -arme Brenner	376
7.3.1.7	NO _x -Minderungspotential der Primärmaßnahmen	376

7.3.2	Sekundärmaßnahmen bei Feuerungsanlagen	377
7.3.2.1	Reduktionsverfahren	377
7.3.2.2	Oxidationsverfahren	386
7.3.3	Katalysatortechnik zur Stickstoffoxidminderung bei Kraftfahrzeugabgasen	386
7.4	Rauchgasentschwefelung	390
7.4.1	Trockene Rauchgasentschwefelung	394
7.4.2	Halbtrockenverfahren - Sprühabsorptionstechnik	398
7.4.3	Nasse Entschwefelungsverfahren	399
7.4.3.1	Kalkwaschverfahren	400
7.4.3.2	Sonstige nasse Rauchgasentschwefelungsverfahren	407
7.5	Schema der Rauchgasreinigungsanlagen eines Kraftwerks	408
7.6	Stand der Abgasreinigung bei den Kraftwerken in Westdeutschland	410
7.7	Entfernung organischer Stoffe aus Abgasen	412
7.7.1	Übersicht über die Verfahren	412
7.7.2	Kondensation	412
7.7.3	Absorption	413
7.7.3.1	Physikalische Absorption	413
7.7.3.2	Chemische Absorption	415
7.7.3.3	Biologische Abluftreinigung - Biowäsche und Biofiltration	416
7.7.4	Adsorption	419
7.7.5	Verbrennung	423
7.7.5.1	Thermische Nachverbrennung (TNV)	423
7.7.5.2	Katalytische Verbrennung (KNV)	425
7.7.6	Membranverfahren	426
7.8	Literatur	428
8	Luftreinhaltevorschriften in der Bundesrepublik Deutschland	435
8.1	Übersicht	435
8.2	Bundes-Immissionsschutzgesetz mit Verordnungen und Verwaltungsvorschriften	437
8.2.1	Regelbereiche	437
8.2.2	Genehmigungsbedürftige Anlagen	437
8.2.2.1	Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV)	437
8.2.2.2	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)	439
8.2.2.3	Genehmigungsverfahren	441
8.2.2.4	Verordnung über Großfeuerungsanlagen (13. BImSchV)	441
8.2.3	Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen	442
8.2.4	Produktbezogener Immissionsschutz	445
8.2.5	Gebietsbezogener Immissionsschutz	446
8.2.5.1	Überwachung der Luftverunreinigung im Bundesgebiet und Luftreinhaltepläne	446
8.2.5.2	Schutz bestimmter Gebiete	447
8.3	Kraftfahrzeugabgase	451
8.4	EG-Richtlinien zum allgemeinen Immissionsschutz	451
8.5	Literatur	453
	Sachverzeichnis	455