

Günter Baumbach

Luftreinhaltung

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

Zweite Auflage

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

Mit 210 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	20
2.1.1.3	Ruß	23
2.1.1.4	Unvollständige Verbrennung in Kraftfahrzeugmotoren	24
2.1.1.5	Kohlenwasserstoff-Emissionen bei verschiedenen Verbrennungsprozessen	25
2.1.2	Schwefelverbindungen	26
2.1.2.1	Schwefel in der Kohle	26
2.1.2.2	Schwefel im Heizöl	27
2.1.2.3	Schwefel im Erdgas	28
2.1.2.4	Gegenüberstellung der Schwefelgehalte verschiedener Brennstoffe	28
2.1.2.5	Produkte bei der Verbrennung schwefelhaltiger Brennstoffe	28
2.1.3	Stickstoffoxide	31
2.1.3.1	Stickstoffoxid-Entstehung	31
2.1.3.2	Stickstoffoxid-Emissionen bei verschiedenen Verbrennungsprozessen	35
2.2	Quellen von Luftverunreinigungen	37
2.2.1	Schwefeloxide	38
2.2.2	Stickstoffoxide	39
2.2.3	Kohlenmonoxid und organische Stoffe	41
2.2.4	Emissionen industrieller und gewerblicher Prozesse	47
2.3	Literatur	47
3	Luftverunreinigungen in der Atmosphäre	51
3.1	Meteorologische Einflüsse auf die Ausbreitung der Luftverunreinigungen	51
3.1.1	Wind	52
3.1.2	Turbulenz	52

3.1.3	Inversion	55
3.1.3.1	Arten von Inversionen	56
3.1.3.2	Entstehung von Inversionen	57
3.1.4	Mischungsschicht und Sperrschichten	59
3.1.5	Sperrschichten und Luftverunreinigungen – Beispiele für die Schadstoffausbreitung	63
3.1.5.1	Großräumige Verteilung von Luftverunreinigungen: SO ₂ -Ferntransporte	63
3.1.5.2	Kleinräumige Verteilung von Luftverunreinigungen in Mittelgebirgstälern	68
3.2	Chemische Umwandlungen von Schadstoffen in der Atmosphäre	72
3.2.1	Allgemeine Betrachtungen	73
3.2.1.1	Atmosphäre und Luftverunreinigungen	73
3.2.1.2	Berechnung von Reaktionsraten	76
3.2.2	Oxidation von SO ₂	77
3.2.2.1	SO ₂ -Oxidation in der Gasphase	77
3.2.2.2	SO ₂ -Umwandlung in flüssiger Phase und an festen Teilchen	78
3.2.3	Reaktionen von Stickstoffoxiden in der Atmosphäre	81
3.2.3.1	NO-Oxidation und Ozonentstehung	81
3.2.3.2	Mitwirkung von Kohlenwasserstoffen bei der NO-Oxidation	86
3.2.3.3	NO ₂ -Oxidation	89
3.2.3.4	NO _x und saurer Regen	90
3.2.4	Die Rolle des Ozons in der Atmosphäre	90
3.2.4.1	Ozon in der Stratosphäre	90
3.2.4.2	Ozon in der Troposphäre	91
3.2.5	Kohlenstoffverbindungen	94
3.2.5.1	Organische Kohlenstoffverbindungen	94
3.2.5.2	Anorganische Kohlenstoffverbindungen	94
3.2.6	Partikel in der Atmosphäre	95
3.2.7	Niederschlagsinhaltsstoffe	95
3.3	Luftverunreinigungen in belasteten und weniger belasteten Gebieten	97
3.3.1	Schwefeldioxid	97
3.3.2	Stickstoffoxide	99
3.3.3	Ozon	101
3.3.4	Kohlenwasserstoffe und andere Spurengase	101
3.3.5	Staubinhaltsstoffe	104
3.4	Modellierung der Schadstoffausbreitung (B. Steisslinger)	104
3.4.1	Zielsetzung und Einsatzbereich von mathematisch-meteorologischen Simulationsmodellen	105
3.4.2	Modellkonzeptionen	106
3.4.2.1	Strömungs- und Turbulenzmodellierung	107
3.4.2.2	Modellierung der Schadstoffausbreitung	108
3.4.3	Berücksichtigung chemischer Umwandlungen in Ausbreitungsmodellen	114

3.4.4	Zusammenfassender Überblick über Modellkonzeptionen	115
3.5	Literatur	116
4	Wirkungen von Luftverunreinigungen	
	(Mit F. Dröscher)	120
4.1	Allgemeines	120
4.1.1	Das Spektrum der möglichen Schädigungen	120
4.1.2	Der Weg von Luftschadstoffen an ihre Wirkungsorte	121
4.2	Klimaveränderungen durch atmosphärische Spurenstoffe	122
4.2.1	Temperaturerhöhung	123
4.2.1.1	Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht	124
4.2.1.2	Treibhauseffekt Infrarotlicht-aktiver Gase	125
4.2.2	Temperaturerniedrigung durch erhöhtes Staub- und Wolkenvorkommen	126
4.2.3	Schwierigkeiten der Prognose	127
4.3	Wirkungen auf Sachgüter	127
4.3.1	Mineralische Baustoffe	128
4.3.2	Metalle	130
4.3.3	Andere Materialien	131
4.4	Wirkungen auf die Vegetation	132
4.4.1	Pflanzenschädigung durch Luftverunreinigungen	134
4.4.1.1	Ermittlung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen	134
4.4.1.2	Wirkungsmechanismen und Schadbilder einzelner Luftschadstoffe	138
4.4.2	Waldschäden	139
4.4.2.1	Schadbilder	140
4.4.2.2	Angenommene Wirkungsmechanismen	142
4.5	Wirkungen auf die menschliche Gesundheit	145
4.5.1	Möglichkeiten und Schwierigkeiten bei der Erfassung der Schadwirkungen	146
4.5.2	Wege der Luftverunreinigungen im menschlichen Körper	148
4.5.3	Wirkungen der wichtigsten Luftschadstoffe	152
4.6	Grenzwerte	152
4.6.1	Immissionswerte der TA Luft	153
4.6.2	MIK-Werte des Vereins Deutscher Ingenieure	153
4.6.3	Smogalarm-Werte	156
4.6.4	MAK-Werte der Deutschen Forschungsgemeinschaft	156
4.7	Literatur	157
5	Meßtechniken zur Erfassung von Luftverunreinigungen	160
5.1	Allgemeine Kriterien	160
5.1.1	Einsatzgebiete der Meßtechnik	160
5.1.2	Diskontinuierliche und kontinuierliche Meßverfahren	160
5.1.3	Physikalisches und chemisches Meßprinzip	163
5.1.4	Unterschiedliche Anforderungen bei Emissions- und Immissionsmessungen	164

5.1.5	Zu erfassende Emissionskomponenten	165
5.1.6	Zu erfassende Immissionskomponenten	166
5.2	Meßverfahren für gasförmige Schadstoffe	168
5.2.1	Fotometrie	169
5.2.1.1	IR-Fotometer	171
5.2.1.2	UV-Fotometer	174
5.2.1.3	Langweg-Fotometrie	178
5.2.2	Kolometrie	179
5.2.3	UV-Fluoreszenz	179
5.2.4	Chemilumineszenz	180
5.2.4.1	NO _x -Messung	180
5.2.4.2	O ₃ -Messung	182
5.2.5	Flammen-Fotometrie	183
5.2.6	Flammen-Ionisation	183
5.2.7	Konduktometrie	185
5.2.8	Amperometrie	187
5.2.9	Coulometrie	188
5.2.10	Potentiometrie	189
5.2.10.1	pH-Messung	190
5.2.10.2	HF- und HCl-Messung mit ionensensitiven Elektroden	190
5.2.10.3	O ₂ -Messung mit dem Festkörperionenleiter Zirkondioxid	191
5.2.11	Paramagnetische Sauerstoffmessung und Messung der Wärmeleitfähigkeit	193
5.2.12	Handanalytische Meßverfahren	194
5.2.13	Chromatographische Verfahren	197
5.2.13.1	Gas-Chromatographie	197
5.2.13.2	Gas-Chromatographie/Massenspektrometrie	199
5.2.13.3	Hochdruckflüssigkeits- und Ionen-Chromatographie	200
5.2.13.4	Bestimmung von hochtoxischen organischen Verbindungen	201
5.2.14	Methode zur Geruchsstoffbestimmung – Olfaktometrie	204
5.3	Meßverfahren für staubförmige Luftverunreinigungen	206
5.3.1	Gravimetrische Staubgehaltsbestimmung an Abgasen	206
5.3.2	Laufende Registrierung der Abgas-Staubkonzentration	209
5.3.3	Bestimmung der Rußzahl von Feuerungsabgasen	212
5.3.4	Bestimmung der Korngrößenverteilung der emittierten Stäube	212
5.3.5	Messung der Staubbiederschläge aus der Atmosphäre	215
5.3.6	Messung der Staubkonzentration der Luft	216
5.3.6.1	Diskontinuierlich arbeitende Filtergeräte	216
5.3.6.2	Automatisch registrierende Staubkonzentrations-Meßgeräte	220
5.3.7	Bestimmung von Staubinhaltsstoffen	222
5.4	Aufbau von Meßanlagen, Probenahmeverfahren und deren Einflüsse auf die Genauigkeit der Messungen	224
5.4.1	Emissionsmessungen an Feuerungs- und Prozeßanlagen	224
5.4.1.1	Ort der Probenahme	224
5.4.1.2	Aufbau des Meßplatzes – Probenahmesystem	226
5.4.1.3	Fehlermöglichkeiten bei der Probenahme	228

5.4.2	Emissionsmessungen an Kraftfahrzeugen	231
5.4.2.1	Abgasprobenahme nach der CVS-Methode	231
5.4.2.2	Unterschiedliche Fahrzyklen	232
5.4.3	Immissionsmessungen	234
5.4.3.1	Bedeutung der Lage der Meßstellen	234
5.4.3.2	Probenahmesysteme in Meßstationen	235
5.4.3.3	Aufbau von Immissionsmeßstationen – Beispiel einer Waldmeßstation	237
5.5	Kalibrierung bei Luftverunreinigungs-Messungen	240
5.5.1	Definitionen	240
5.5.2	Prüfgase	241
5.5.2.1	Statische Verfahren zur Prüfgasherstellung	241
5.5.2.2	Dynamische Verfahren – Mischen von Volumenströmen	242
5.5.2.3	Beispiel einer Prüfgasherstellung	242
5.5.2.4	Schwierigkeiten bei der Prüfgasherstellung	243
5.5.3	Bedeutung der Kalibrierung	244
5.6	Genauigkeit von Meßverfahren und Meßgeräten	244
5.6.1	Übersicht über Verfahrenskenngrößen	244
5.6.2	Linearität der Eichfunktion und Empfindlichkeit	249
5.6.3	Querempfindlichkeit	250
5.6.4	Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Meßverfahren durch Ringversuche	252
5.6.5	Fehlerbetrachtung am Beispiel einer vollständigen Emissionsmessung	255
5.7	Literatur	256
6	Auswertung von Luftverunreinigungs-Messungen	264
6.1	Bestimmung von Schadstoffemissionen	264
6.1.1	Ermittlung von Schadstoffemissionen aus Konzentrationsmessungen an Abgasen	264
6.1.1.1	Emissionsströme und Emissionsfaktoren	264
6.1.2	Berechnung von Schadstoffemissionen aus Brennstoffeigenschaften	266
6.1.2.1	Schwefeldioxid	266
6.1.2.2	Stickstoffoxide	267
6.1.2.3	Produkte unvollständiger Verbrennung	267
6.1.2.4	Schwermetallemissionen bei Ölfeuerungen	267
6.1.3	Erfassung der Schadstoff-Emissionen eines Gebietes in Emissionskatastern	268
6.1.3.1	Räumliche Schadstoffverteilung	268
6.1.3.2	Bestimmung der Schadstoff-Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs	269
6.1.3.3	Schadstoff-Emissionen von Hausheizungen und Kleingewerbe	271
6.1.3.4	Schadstoff-Emissionen von Industrie- und Gewerbeanlagen	271
6.1.3.5	Zusammengefaßte Darstellung der Jahresemissionen	274
6.1.3.6	Zeitliche Schadstoffverteilung	275

6.2	Auswertung und Darstellung von Schadstoff- Immissionsmessungen	277
6.2.1	Zeitliche Auflösung und Mittelwertbildung	277
6.2.2	Komprimierung und Darstellung von Meßdaten kontinuierlicher Messungen	280
6.2.2.1	Ungeglättete Monatsverläufe	280
6.2.2.2	Mittelwertbildung für die Smogwarnung	280
6.2.2.3	Tagesgänge	280
6.2.2.4	Langfristige Jahresverläufe	283
6.2.3	Häufigkeitsverteilung	285
6.2.4	Flächenhafte Verteilung von Schadstoffen	288
6.2.4.1	Bestimmungsmethode und graphische Darstellung	288
6.2.4.2	Aussagekraft und Unsicherheit von Stichproben-Meßwerten	289
6.2.5	Methoden zur Untersuchung von Gesetzmäßigkeiten im Schadstoffaufkommen	292
6.2.5.1	Mittlere Tagesgänge	292
6.2.5.2	Korrelationsrechnungen	292
6.2.5.3	Schadstoffwindrosen	295
6.2.5.4	Abklingkurven	299
6.3	Literatur	300
7	Verfahren zur Emissionsminderung	304
7.1	Allgemeine Betrachtungen	304
7.1.1	Verfahrensumstellung	305
7.1.2	Emissionsminderung bei Feuerungsanlagen	307
7.1.2.1	Produkte unvollständiger Verbrennung	308
7.1.2.2	Staub	308
7.1.2.3	Stickstoffoxide	309
7.1.2.4	Schwefeldioxid	309
7.1.3	Wirksamkeit von Abgasreinigungsmaßnahmen	311
7.2	Verfahren zur Entstaubung von Abgasen (H. Gross)	313
7.2.1	Massenkraftentstauber	314
7.2.1.1	Trägheitskraftabscheider	315
7.2.1.2	Fliehkraftabscheider	316
7.2.2	Naßentstaubung	319
7.2.2.1	Grundlagen der Naßentstaubung	320
7.2.2.2	Bauarten von Naßabscheidern	323
7.2.3	Elektrische Staubabscheider	327
7.2.3.1	Verfahrensprinzip	327
7.2.3.2	Wirkungsweise	328
7.2.3.3	Abscheidegleichung	333
7.2.3.4	Bauarten	334
7.2.4	Filternde Entstauber	336
7.2.4.1	Schlauchfilter	337
7.2.4.2	Taschen- oder Rahmenfilter	341

7.3	Stickstoffoxidminderung bei Verbrennungsprozessen	341
7.3.1	Primärmaßnahmen bei Feuerungsanlagen	341
7.3.1.1	Verringerung des Luftüberschusses	342
7.3.1.2	Stufenverbrennung, Stufenmischbrenner und Oberluftdüsen	342
7.3.1.3	Geringe Luftvorwärmung	343
7.3.1.4	Verminderung der volumenspezifischen Brennraumbelastung	343
7.3.1.5	Rauchgas-Rückführung	345
7.3.1.6	NO _x -arme Brenner	346
7.3.1.7	NO _x -Minderungspotential der Primärmaßnahmen	346
7.3.2	Sekundärmaßnahmen bei Feuerungsanlagen	347
7.3.2.1	Reduktionsverfahren	347
7.3.2.2	Oxidationsverfahren	356
7.3.3	Katalysatortechnik zur Stickstoffoxidminderung bei Kraftfahrzeugabgasen	356
7.4	Rauchgasentschwefelung	360
7.4.1	Trockene Rauchgasentschwefelung	364
7.4.2	Halbtrockenverfahren – Sprühabsorptionstechnik	368
7.4.3	Nasse Entschwefelungsverfahren	369
7.4.3.1	Kalkwaschverfahren	370
7.4.3.2	Sonstige nasse Rauchgasentschwefelungsverfahren	377
7.5	Schema der Rauchgasreinigungsanlagen eines Kraftwerks	378
7.6	Stand der Rauchgasentschwefelung der Kraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland	380
7.7	Entfernung organischer Stoffe aus Abgasen	381
7.7.1	Übersicht über die Verfahren	381
7.7.2	Kondensation	381
7.7.3	Absorption	382
7.7.3.1	Physikalische Absorption	383
7.7.3.2	Chemische Absorption	385
7.7.3.3	Biologische Abluftreinigung – Biowäsche und Biofiltration	385
7.7.4	Adsorption	388
7.7.5	Verbrennung	393
7.7.5.1	Thermische Nachverbrennung (TNV)	393
7.7.5.2	Katalytische Verbrennung (KNV)	394
7.7.6	Membranverfahren	396
7.8	Literatur	397
8	Luftreinhaltevorschriften in der Bundesrepublik Deutschland	404
8.1	Übersicht	404
8.2	Bundes-Immissionsschutzgesetz mit Verordnungen und Verwaltungsvorschriften	406
8.2.1	Regelbereiche	406
8.2.2	Genehmigungsbedürftige Anlagen	406
8.2.2.1	Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV)	406
8.2.2.2	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)	408
8.2.2.3	Genehmigungsverfahren	410

8.2.2.4	Verordnung über Großfeuerungsanlagen (13. BImSchV)	410
8.2.3	Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen	411
8.2.4	Produktbezogener Immissionsschutz	414
8.2.5	Gebietsbezogener Immissionsschutz	415
8.2.5.1	Überwachung der Luftverunreinigung im Bundesgebiet und Luftreinhaltepläne	415
8.2.5.2	Schutz bestimmter Gebiete	416
8.3	Kraftfahrzeugabgase	420
8.4	EG-Richtlinien zum allgemeinen Immissionsschutz	420
8.5	Literatur	422
Sachverzeichnis		425