

Günter Baumbach

# Luftreinigung

3. Auflage



Springer-Verlag

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

291/3602 INSTITUT  
FÜR METEOROLOGIE U. KLIMATOLOGIE  
UNIVERSITÄT HANNOVER  
HERRENHÄUSER STR. 2 · 30419 HANNOVER

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong Barcelona  
Budapest

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Allgemeiner Überblick</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1	Reine Luft und Luftverunreinigungen . . . . .	1
1.2	Geschichtlicher Überblick (F. Dröscher) . . . . .	2
1.3	Begriffserläuterungen . . . . .	10
1.4	Literatur . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Entstehung und Quellen von Luftverunreinigungen</b> . . . . .	<b>14</b>
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
<b>3</b>	<b>Luftverunreinigungen in der Atmosphäre . . . . .</b>	<b>75</b>
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 <sub>2</sub> -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 <sub>2</sub> . . . . .	101
3.2.2.1	SO <sub>2</sub> -Oxidation in der Gasphase . . . . .	102
3.2.2.2	SO <sub>2</sub> -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 <sub>2</sub> -Oxidation . . . . .	114
3.2.3.4	NO <sub>x</sub> 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
<b>4</b>	<b>Wirkungen von Luftverunreinigungen (mit F. Dröscher) . . . . .</b>	<b>150</b>
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	Temperaturerniedrigung 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
<b>5</b>	<b>Meßtechniken zur Erfassung von Luftverunreinigungen . . . . .</b>	<b>190</b>
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 <sub>x</sub> -Messung . . . . .	210
5.2.4.2	O <sub>3</sub> -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 <sub>2</sub> -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 Staubbiederschläge 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	Beispiele 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
<b>6</b>	<b>Auswertung von Luftverunreinigungs-Messungen . . . . .</b>	<b>294</b>
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

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
<b>7</b>	<b>Verfahren zur Emissionsminderung . . . . .</b>	<b>334</b>
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 <sub>x</sub> -arme Brenner . . . . .	376
7.3.1.7	NO <sub>x</sub> -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	Katalysatorteknik 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
<b>8</b>	<b>Luftreinhaltevorschriften in der Bundesrepublik Deutschland . .</b>	<b>435</b>
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
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>455</b>