

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Chemisch-physikalischer Überblick über die Stickstoffoxide als luftverunreinigende Stoffe</b>	<b>1</b>
1.1	Definition, Anzahl und Einteilung luftverunreinigender Stoffe	1
1.1.1	Definitionen und Erläuterungen	1
1.1.2	Anzahl luftverunreinigender Stoffe	1
1.1.3	Einteilungsprinzipien für luftverunreinigende Stoffe	2
1.2	Oxide des Stickstoffs im Überblick	4
1.3	Distickstoffoxid ( $N_2O$ )	6
1.3.1	Entstehung	6
1.3.2	Eigenschaften	7
1.3.3	$N_2O$ -Gehalt der Troposphäre	8
1.4	Stickstoffmonoxid (NO)	9
1.5	Stickstoffdioxid ( $NO_2$ ) und Distickstofftetraoxid ( $N_2O_4$ )	9
1.5.1	Entstehung des Stickstoffdioxids	9
1.5.2	Eigenschaften des Stickstoffdioxids	12
1.5.3	Gleichgewicht mit Distickstofftetraoxid	13
1.6	Weitere Stickstoffoxide	14
1.6.1	Distickstofftrioxid ( $N_2O_3$ )	14
1.6.2	Distickstoffpentoxid ( $N_2O_5$ )	15
1.6.3	Stickstofftrioxid ( $NO_3$ )	16
1.7	Literatur	16
1.8	Formelzeichen	18
<b>2</b>	<b>Entstehung der Stickstoffoxide in Verbrennungsprozessen</b>	<b>19</b>
2.1	Übersicht zu den Bildungsmechanismen für Stickstoffmonoxid	19
2.2	Entstehung des Stickstoffmonoxids aus dem Stickstoff der Brennstoffe	20
2.2.1	Grundsätzliches zum Brennstoff-NO	20
2.2.2	Stickstoffgehalt und weitere Brennstoffkenngrößen	21
2.2.2.1	Stickstoffgehalt	21
2.2.2.2	Weitere Brennstoffkenngrößen	22
2.2.3	Stickstoffmonoxid-Bildung aus den Flüchtigen Bestandteilen	23
2.2.4	Stickstoffmonoxid-Bildung aus dem Restkoks	25
2.2.5	Heterogene Reduktion des Stickstoffoxids	25
2.2.6	Einflußgrößen auf die Umwandlungsrate	26
2.3	Thermisches Stickstoffmonoxid	29
2.3.1	Betrachtung der Bruttoreaktion	29
2.3.2	Zeldovich-Mechanismus	32
2.3.3	Weitere Reaktionsmechanismen	35
2.3.4	Betrachtung der Haupteinflußgrößen	35

## X Inhaltsverzeichnis

2.4	Promptes Stickstoffmonoxid . . . . .	37
2.4.1	Erläuterungen zur Entstehung . . . . .	37
2.4.2	Einflußgrößen und Bedeutung . . . . .	38
2.5	Entstehung von Stickstoffdioxid . . . . .	39
2.5.1	Möglichkeiten der Stickstoffdioxid-Bildung . . . . .	39
2.5.2	Anhaltswerte für den volumetrischen NO <sub>2</sub> -Anteil . . . . .	40
2.6	Wechselwirkung der Stickstoffoxide mit den Schwefeloxiden . . . . .	41
2.7	Literatur . . . . .	41
2.8	Formelzeichen . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Emissionen und Emissionsgrenzwerte der Feuerungen und stationären Gasturbinen . . . . .</b>	<b>45</b>
3.1	Grundsätzliches zur Emission . . . . .	45
3.1.1	Erläuterungen zum Begriff „Emission“ . . . . .	45
3.1.2	Ermittlung des Emissionsmassenstromes . . . . .	45
3.1.3	Definition und Ermittlung der Emissionskonzentrationen . . . . .	46
3.1.4	Definition und Ermittlung der Emissionsfaktoren . . . . .	47
3.1.5	Grundsätzliches zum internationalen Vergleich von Emissionsbegrenzungen . . . . .	48
3.2	Verbrennung von gasförmigen Brennstoffen . . . . .	49
3.2.1	Wichtige Einflußgrößen auf die NO <sub>x</sub> -Emission . . . . .	49
3.2.2	Größe der Emissionen . . . . .	52
3.2.3	Entwicklung und Stand bundesdeutscher Emissionsbegrenzungen . . . . .	54
3.2.4	Entwicklung und Stand der Emissionsbeschränkungen in anderen Staaten . . . . .	55
3.3	Verbrennung von flüssigen Brennstoffen . . . . .	57
3.3.1	Emissionen bei der Verbrennung von Heizöl EL . . . . .	57
3.3.2	Bedeutung und Emissionen der Feuerungen für schweres Heizöl . . . . .	58
3.3.3	Grenz- und Richtwerte für flüssige Brennstoffe . . . . .	60
3.4	Verbrennung von Kohlen . . . . .	62
3.4.1	Emissionen und Grenzwerte der Schmelzfeuerungen . . . . .	62
3.4.2	Emissionen der Trockenfeuerungen für Steinkohle . . . . .	63
3.4.3	Zusammenstellung nationaler Grenzwerte . . . . .	64
3.4.4	Trockenfeuerungen für Braunkohle . . . . .	66
3.4.5	Mechanische Rostfeuerungen . . . . .	67
3.4.6	Handbeschickte Rostfeuerungen . . . . .	68
3.5	Feuerungen für Holz und kommunalen Müll . . . . .	69
3.5.1	Emissionen und Grenzwerte der Holzfeuerungen . . . . .	69
3.5.2	Bedeutung und Emissionen der Müllfeuerungen . . . . .	70
3.5.3	Grenzwerte für Müllfeuerungen . . . . .	71
3.6	Wirbelschichtfeuerungen . . . . .	71
3.6.1	Systeme von Wirbelschichtfeuerungen . . . . .	71
3.6.2	Emissionen atmosphärischer Wirbelschichtfeuerungen . . . . .	73
3.6.3	Emissionsgrenzwerte . . . . .	73
3.7	Stationäre Gasturbinen . . . . .	74
3.7.1	Bedeutung und Emissionen . . . . .	74
3.7.2	Amerikanische und bundesdeutsche Grenzwerte . . . . .	75
3.8	Literatur . . . . .	75
3.9	Formelzeichen . . . . .	79
<b>4</b>	<b>Emissionen und Emissionsgrenzwerte der Verbrennungsmotoren . . . . .</b>	<b>80</b>
4.1	Grundsätzliches zur Emission mobiler Anlagen . . . . .	80
4.1.1	Emissionsmaße für mobile Anlagen . . . . .	80

4.1.2	Notwendigkeit von Fahrtests . . . . .	81
4.1.3	Beispiele internationaler Fahrzyklen für Pkw . . . . .	82
4.1.4	Bundesdeutsche Fahrzyklen . . . . .	86
4.1.5	Fahrzyklen für Nutzfahrzeuge mit Dieselmotor . . . . .	90
4.1.6	Ermittlung der Quellstärken des Kraftfahrzeugverkehrs . . . . .	91
4.2	Ottomotoren in Pkw, Kombi und leichten Nutzfahrzeugen . . . . .	92
4.2.1	Einflußgrößen auf die Emissionen der Ottomotoren . . . . .	92
4.2.2	Mittlere Emissionen bundesdeutscher Pkw . . . . .	96
4.2.3	Mittlere regionale und nationale Emissionsfaktoren . . . . .	99
4.2.4	Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für Pkw . . . . .	101
4.3	Mobile Dieselmotoren (schwere Nutzfahrzeuge) . . . . .	102
4.3.1	Bedeutung der Dieselmotoren im Straßenverkehr . . . . .	102
4.3.2	Einflußgrößen bei Dieselmotoren . . . . .	103
4.3.3	Emissionen bundesdeutscher Kraftfahrzeuge . . . . .	106
4.3.4	Mittlere regionale und nationale Emissionsfaktoren . . . . .	109
4.3.5	Entwicklung der Emissionsgrenzwerte . . . . .	109
4.3.6	Vergleich zwischen Otto- und Dieselmotor im Pkw . . . . .	111
4.4	Stationäre Verbrennungsmotoren . . . . .	112
4.4.1	Anwendungsgebiete . . . . .	112
✖ 4.4.2	Anhaltswerte für die Emissionen . . . . .	112
✖ 4.4.3	Bundesdeutsche und ausländische Grenzwerte . . . . .	113
4.5	Literatur . . . . .	114
4.6	Formelzeichen . . . . .	117
<b>5</b>	<b>Maßnahmen zur Senkung der Emissionen . . . . .</b>	<b>118</b>
5.1	Überblick zu den emissionsmindernden Maßnahmen . . . . .	118
5.2	Primärmaßnahmen . . . . .	119
5.2.1	Grundsätzliches zu den Primärmaßnahmen . . . . .	119
5.2.2	Minderung des Sauerstoffangebots . . . . .	121
5.2.2.1	Nahstöchiometrische Verbrennung . . . . .	121
5.2.2.2	Gestufte Luftzufuhr . . . . .	121
5.2.2.3	Luftstufung bei Verbrennungsmotoren . . . . .	124
5.2.3	Senkung der Verbrennungstemperatur insbesondere durch äußere Kühlung . . . . .	124
5.2.3.1	Verminderung der Feuerraumbelastung . . . . .	124
5.2.3.2	Oberflächenverbrennung und katalytische Verbrennung . . . . .	125
5.2.4	Senkung der Verbrennungstemperatur durch innere Flammkühlung . . . . .	125
5.2.4.1	Überstöchiometrische Verbrennung (Magerkonzept) . . . . .	125
5.2.4.2	Äußere und innere Abgasrezirkulation . . . . .	126
5.2.4.3	Zufuhr von Wasser oder Dampf . . . . .	127
5.2.5	Gestufte Brennstoffzufuhr . . . . .	128
5.2.6	NO <sub>x</sub> -arme Brenner für Feuerungen . . . . .	129
5.2.7	Kombination der Primärmaßnahmen bei Feuerungen . . . . .	130
5.3	Grundsätzliches zu den Abgasreinigungsanlagen (Sekundärmaßnahmen, Abgasnachbehandlung) . . . . .	133
5.3.1	Anforderungen an Abgasreinigungsanlagen . . . . .	133
5.3.2	Verfahrensprinzipien zur NO <sub>x</sub> -Abscheidung . . . . .	134
5.3.3	Vielfalt und Auswahl der Verfahren . . . . .	136
5.3.4	Grundsätzliches zur Katalyse . . . . .	136
5.3.4.1	Definition und Aufbau eines Katalysators . . . . .	136
5.3.4.2	Technische Katalysator-Kenngrößen . . . . .	137
5.3.4.3	Katalysatorarten und Anforderungen . . . . .	138
5.4	Trockene selektive Reduktion . . . . .	140
5.4.1	Chemismus der selektiven Reduktion . . . . .	140

5.4.2	Selektive nichtkatalytische (thermische) Reduktion (SNR-Verfahren) . . . . .	142
5.4.3	Katalysatoren für die selektive katalytische Reduktion (SCR-Verfahren) . . . . .	143
5.4.3.1	Schwermetalloxid-Katalysatoren . . . . .	143
5.4.3.2	Zeolithe . . . . .	146
5.4.3.3	Eisenoxid-Chromoxid-Katalysatoren . . . . .	146
5.4.3.4	Aktivkokse . . . . .	147
5.4.3.5	Einflußgrößen auf den Abscheidegrad . . . . .	148
5.4.4	Abgasseitige Anordnung des Katalysators . . . . .	150
5.4.5	Konstruktive Gestaltung der DENOX-Reaktoren . . . . .	152
5.4.6	Entwicklungsstand des SCR-Verfahrens . . . . .	154
5.4.7	SCR-Verfahren für Verbrennungsmotoren . . . . .	156
5.5	Trockene nichtselektive katalytische Reduktion . . . . .	157
5.5.1	Terminologie der Pkw-Abgasreinigungssysteme . . . . .	157
5.5.2	Chemismus der nichtselektiven Reduktion . . . . .	158
5.5.3	Aufbau und Zusammensetzung des Katalysators . . . . .	160
5.5.4	Bestandteile des Abgasreinigungssystems . . . . .	162
5.5.5	NCR-Verfahren bei stationären Anlagen . . . . .	163
5.6	Übersicht zu den Simultanverfahren . . . . .	164
5.6.1	Erläuterungen zum Begriff „simultan“ . . . . .	164
5.6.2	Trockene und halbtrockene Simultanverfahren . . . . .	164
5.6.3	Nasse Simultanverfahren . . . . .	165
5.7	Literatur . . . . .	166
5.8	Formelzeichen . . . . .	171
<b>6</b>	<b>Gebietsbezogene jährliche Emissionen . . . . .</b>	<b>172</b>
6.1	Biogene Emissionen . . . . .	172
6.1.1	Überblick zu den globalen Emissionen . . . . .	172
6.1.2	Entstehung durch elektrische Entladungen . . . . .	172
6.1.3	Freisetzung aus Böden . . . . .	174
6.1.4	Diffusion aus der Stratosphäre . . . . .	174
6.1.5	Gemischt biogene/anthropogene Emissionen . . . . .	175
6.1.6	Biogene Emissionen anderer Gebiete . . . . .	176
6.1.7	Zusammenfassung . . . . .	176
6.2	Grundsätzliches zur Ermittlung anthropogener Emissionen . . . . .	178
6.2.1	Einteilung der anthropogenen Emissionen . . . . .	178
6.2.2	Methoden zur Ermittlung der Emissionen . . . . .	179
6.2.3	Bedeutung der Emissionsfaktoren (Schätzgenauigkeit) . . . . .	180
6.3	Globale und großräumige anthropogene Emissionen . . . . .	181
6.3.1	Globale anthropogene Emissionen . . . . .	181
6.3.2	Emissionen der USA . . . . .	182
6.3.3	Emissionen Japans . . . . .	184
6.3.4	Europäische Emissionen . . . . .	185
6.4	Anthropogene Emissionen der Bundesrepublik Deutschland . . . . .	186
6.4.1	Derzeitige Größe und Aufteilung . . . . .	186
6.4.2	Bisherige und zukünftige Entwicklung in der Bundesrepublik . . . . .	187
6.4.3	Emissionen der deutschen Bundesländer . . . . .	190
6.4.4	Emissionen der Belastungsgebiete und Ballungsräume . . . . .	191
6.5	Anthropogene Emissionen einiger EG-Staaten . . . . .	192
6.6	Anthropogene Emissionen einiger Comecon-Staaten . . . . .	194
6.7	Anthropogene Emissionen Österreichs, Schwedens und der Schweiz . . . . .	195
6.8	Gegenüberstellung nationaler Emissionen . . . . .	196
6.9	Literatur . . . . .	197

<b>7</b>	<b>Betrachtung einiger Vorgänge der Transmission</b>	201
7.1	Erläuterung des Begriffs „Transmission“	201
7.2	Advektion und Austausch (Ausbreitungstheorie)	202
7.2.1	Klassische Ausbreitungstheorie	202
7.2.2	Ermittlung von Schornsteinmindesthöhen	203
7.2.3	Immissionsprognose	204
7.3	Chemische Umwandlungen	205
7.3.1	Einige grundlegende Hinweise	205
7.3.2	Oxidationsreaktionen für Stickstoffmonoxid	206
7.3.3	Stickstoffmonoxid-Oxidation in Abgasfahnen (erweiterte Ausbreitungstheorie)	208
7.3.4	Anteil des Stickstoffdioxids an den Stickstoffoxiden in Bodennähe	209
7.3.5	Entstehung weiterer Folgeprodukte	210
7.4	Trockene Deposition	213
7.4.1	Erläuterung theoretischer Grundlagen	213
7.4.2	Depositionsgeschwindigkeit und ihre Einflußgrößen	214
7.4.3	Anhaltswerte für die Depositionsgeschwindigkeit	215
7.4.4	Größe der trockenen Deposition	217
7.5	Nasse Deposition	219
7.5.1	Grundsätzliche Erläuterungen	219
7.5.2	Quantitative Beschreibung	220
7.5.3	Acidität des meteorologischen Niederschlags (Saurer Regen)	221
7.5.4	Umfang der nassen Nitrat-Deposition	222
7.6	Literatur	223
7.7	Formelzeichen	227
<b>8</b>	<b>Immissionen der natürlichen und belasteten Atmosphäre</b>	228
8.1	Grundsätzliches zur „Immission“	228
8.1.1	Definition des Begriffs „Immission“	228
8.1.2	Immissionskonzentration als stochastische Variable	230
8.1.3	Kenngroßen der Immissionskonzentration	232
8.1.3.1	Arithmetisches Mittel und erste Immissionskenngroße	232
8.1.3.2	Standardabweichung und zweite Immissionskenngroße	232
8.1.3.3	Einfluß des Meßzeitintervalls auf die Kenngroßen	233
8.2	Abhängigkeit der Immissionskonzentration von wichtigen Einflußgrößen	234
8.2.1	Problemstellung	234
8.2.2	Emissionsseitige Ersatzgrößen	235
8.2.3	Transmissionsseitige Einflußgrößen	236
8.2.4	Austauscharme Wetterlagen	237
8.3	Bedeutung der Markierungsgrößen Raum und Zeit	238
8.3.1	Räumliche und zeitliche Erfassung der Immissionen	238
8.3.2	Räumliche Struktur der Stickstoffoxid-Immissionen	239
8.3.2.1	Flächenmäßige Unterschiede (Inhomogenität)	239
8.3.2.2	Horizontale Entfernungsabhängigkeit	240
8.3.2.3	Höhenabhängigkeit	240
8.3.3	Zeitliche Variabilität der Immissionen	241
8.3.3.1	Betrachtung flächendeckender Immissionsmessungen	241
8.3.3.2	Jahresgang	242
8.3.3.3	Wochengang	242
8.3.3.4	Tagesgang	242
8.4	Angaben zur Größe der Immissionen	243
8.4.1	Immissionen in unbelasteten Gebieten	243
8.4.1.1	Stickstoffdioxid	243

8.4.1.2	Stickstoffmonoxid . . . . .	244
8.4.2	Stickstoffdioxid-Immissionen in bundesdeutschen Städten . . . . .	245
8.4.2.1	Ergebnisse der Meßstationen . . . . .	245
8.4.2.2	Ergebnisse von Pegelmessungen . . . . .	245
8.4.3	Stickstoffmonoxid-Immissionen in bundesdeutschen Städten . . . . .	246
8.5	Lufthygienische Beurteilung der Stickstoffdioxid-Immissionen . . . . .	247
8.6	Bisheriger Trend der Immissionen . . . . .	248
8.6.1	Reinluftgebiete der Bundesrepublik Deutschland . . . . .	248
8.6.2	Ballungsräume der Bundesrepublik Deutschland . . . . .	248
8.6.3	Betrachtung der japanischen Situation . . . . .	250
8.7	Herkunft der Immissionen . . . . .	250
8.7.1	Hinweise aus Immissionsmessungen . . . . .	250
8.7.2	Ermittlung durch Ausbreitungsrechnungen . . . . .	252
8.8	Literatur . . . . .	253
8.9	Formelzeichen . . . . .	257
<b>9</b>	<b>Wirkungen und Grenzwerte . . . . .</b>	<b>258</b>
9.1	Allgemeine Erläuterungen zu den Wirkungen . . . . .	258
9.2	Direkte Wirkungen des Stickstoffmonoxids . . . . .	260
9.3	Direkte Wirkungen des Stickstoffdioxids . . . . .	260
9.3.1	Wirkungen auf Menschen . . . . .	260
9.3.2	Wirkungen auf Pflanzen . . . . .	262
9.3.3	Wirkungen auf Materialien . . . . .	264
9.3.4	Wirkungen auf die Atmosphäre . . . . .	265
9.4	Wirkungen der Folgeprodukte der Stickstoffoxide . . . . .	265
9.4.1	Wirkungen der Oxidantien . . . . .	265
9.4.1.1	Erläuterungen zum Begriff „Oxidantien“ . . . . .	265
9.4.1.2	Wirkungen des Ozons . . . . .	266
9.4.1.3	Wirkungen der PANs . . . . .	268
9.4.2	Wirkungen säurehaltiger Niederschläge . . . . .	268
9.4.3	Wirkungen auf Böden und Gewässer . . . . .	269
9.5	Grenzwerte zur Beurteilung der Wirkungen . . . . .	269
9.5.1	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration und Technische Richtkonzentration . . . . .	269
9.5.2	Maximale Immissionskonzentration der VDI-Richtlinien . . . . .	270
9.5.3	Immissionswerte der TAL . . . . .	272
9.5.4	Bundesdeutsche Richtwerte für die Bauleitplanung . . . . .	274
9.5.5	Japanische Immissionsgrenzwerte . . . . .	274
9.5.6	Immissionsgrenzwerte der USA . . . . .	275
9.5.7	Immissionsgrenzwerte europäischer Staaten . . . . .	275
9.5.8	Immissionsgrenzwerte der Europäischen Gemeinschaft (EG) und der Weltgesundheitsorganisation (WHO) . . . . .	276
9.5.9	Vergleich der nationalen Immissionsgrenzwerte . . . . .	277
9.5.10	Auslösekonzentrationen für austauscharme Wetterlagen . . . . .	278
9.6	Literatur . . . . .	279
<b>10</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>283</b>
10.1	Literatur zur Emissions- und Immissionsmeßtechnik . . . . .	283
10.2	Häufig benutzte Abkürzungen . . . . .	284
10.3	Wichtige Maßeinheiten und Umrechnungen . . . . .	286
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>289</b>