

Heinz Brauer (Hrsg.)

# Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik

Band 3:  
Additiver Umweltschutz:  
Behandlung von Abluft und Abgasen

Mit 374 Abbildungen und 47 Tabellen



Springer

# Inhaltsverzeichnis zu Band 3:

## Additiver Umweltschutz: Behandlung von Abluft und Abgasen

1	Emissionsanalyse technischer Anlagen: H. Brauer	1
1.1	Einleitung . . . . .	1
1.2	Emissionsarten . . . . .	2
1.3	Emissionsquellen . . . . .	4
1.4	Struktur und Funktionen von Stoff- und Energiewandlungsanlagen . . . . .	12
1.4.1	Schematisierte Struktur von Produktionsanlagen	12
1.4.2	Eingangsstufe . . . . .	13
1.4.3	Stoff- und Energiewandlungsstufen . . . . .	14
1.4.4	Produktstufe . . . . .	16
1.4.5	Reinigungsstufe . . . . .	16
1.4.6	Emissionsstufe . . . . .	19
1.4.7	Schlußfolgerungen aus der Funktionsanalyse der Stufen einer Produktionsanlage . . . . .	20
1.5	Weg der Schadstoffe und der Trägermedien durch die Produktionsanlage . . . . .	21
1.6	Technische Maßnahmen zur Minderung von Emissionen . . . . .	22
1.6.1	Prozeßtechnische Maßnahmen zur Emissionsminderung . . . . .	23
1.6.1.1	Eingangsstufe . . . . .	23
1.6.1.2	Stoff- und Energiewandlungsstufen . . . . .	23
1.6.1.3	Produktstufe . . . . .	24
1.6.1.4	Reinigungsstufe . . . . .	25
1.6.1.5	Emissionsstufe . . . . .	25
1.6.2	Geräte- und anlagentechnische Maßnahmen zur Emissionsminderung . . . . .	26
1.6.2.1	Die emissionsdichte Anlage als Ziel . . . . .	26
1.6.2.2	Einschränkung der Schadstoffproduktion . . . . .	27
1.6.3	Zusammenfassung der prozeß- sowie geräte- und anlagentechnischen Maßnahmen . . . . .	28
1.7	Graphische Darstellung der Emissionen . . . . .	29
	Literatur . . . . .	29

**Verfahren zur Minderung staubförmiger Schadstoffemissionen**

2	Physikalische Grundlagen der Partikelabscheidung aus Gasen: K. Leschonski. . . . .	33
2.1	Einführung . . . . .	33
2.2	Aufgabenstellung und Kennzeichnung der Partikelabscheidung. . . . .	34
2.3	Prinzipielle Möglichkeiten zur Partikelabscheidung aus Gasen . . . . .	37
2.4	Die Vorausberechnung von Bahnkurven . . . . .	38
2.4.1	Einführung. . . . .	38
2.4.2	Die Differentialgleichung zur Beschreibung der Bewegung einer Kugel in einer ebenen Strömung . . . . .	39
2.4.3	Die Bewegungsgleichung im Bereich der Gültigkeit des Stokesschen Widerstandsgesetzes . . . . .	42
2.5	Trenngrenzen und Trennkurven einiger wichtiger Abscheidemechanismen . . . . .	43
2.5.1	Die Querstromabscheidung in einer ebenen, geraden Kanalströmung . . . . .	44
2.5.2	Die Querstromabscheidung im gekrümmten Kanal . . . . .	47
2.5.3	Die Querstrom- bzw. Trägheitsabscheidung an frei beweglichen Kugeln (Tropfen) oder feststehenden Zylindern (Fasern) . . . . .	48
2.6	Trennkurven . . . . .	50
	Symbolverzeichnis . . . . .	55
	Literatur . . . . .	57
3	Zyklonabscheider: M. Bohnet . . . . .	58
3.1	Einleitung . . . . .	58
3.2	Theorie des Abscheidvorgangs . . . . .	60
3.2.1	Grenzpartikelgröße . . . . .	60
3.2.2	Umfangsgeschwindigkeit . . . . .	64
3.2.3	Fraktionsabscheidegrad . . . . .	67
3.2.4	Gesamtabscheidegrad . . . . .	70
3.3	Druckverlust . . . . .	71
3.4	Optimalzyklone . . . . .	74
3.5	Heißgaszyklone . . . . .	78
3.6	Sonderbauarten . . . . .	82
	Symbolverzeichnis . . . . .	86
	Literatur . . . . .	88
4	Elektroabscheider: G. Mayer-Schwinning . . . . .	89
4.1	Einführung . . . . .	89
4.1.1	Allgemeines . . . . .	89
4.1.2	Historischer Hintergrund . . . . .	90
4.2	Wirkungsweise von Elektroabscheidern . . . . .	92
4.2.1	Aufbau und Abscheideprinzip . . . . .	92

4.2.2	Elektrofilterauslegung . . . . .	94
4.2.3	Aufladung und Abscheidung von Partikeln . . . . .	95
4.2.4	Staubwiderstand . . . . .	97
4.3	Ausführungsformen von Elektroabscheidern . . . . .	99
4.3.1	Trocken arbeitende Elektroabscheider . . . . .	99
4.3.1.1	Bauarten . . . . .	99
4.3.1.2	Das Sprühsystem . . . . .	100
4.3.1.3	Das Niederschlagselektrodensystem . . . . .	104
4.3.1.4	Gassenabstand . . . . .	106
4.3.2	Naßelektroabscheider . . . . .	110
4.3.2.1	Horizontal-Naßelektroabscheider . . . . .	110
4.3.2.2	Röhren-Elektroabscheider . . . . .	111
4.3.3	Strömungsverteilung im Elektrofilter . . . . .	113
4.4	Spannungsversorgung, Hochspannungssteuerung und Prozeßleittechnik . . . . .	114
4.5	Anwendungen . . . . .	119
4.5.1	Kraftwerke . . . . .	119
4.5.1.1	Steinkohlegefeuerte Kraftwerke . . . . .	122
4.5.1.2	Braunkohlegefeuerte Kraftwerke . . . . .	123
4.5.1.3	Elektroabscheider hinter ZWS-Verbrennungsanlagen . . . . .	123
4.5.1.4	Entstaubung ölgefeuerter Kessel . . . . .	124
4.5.1.5	Entstaubung nach trockener und halbtrockener Schadgasreinigung . . . . .	125
4.5.2	Entstaubung im Eisenhüttenbereich . . . . .	127
4.5.2.1	Sinteranlagen . . . . .	127
4.5.2.2	Hochofen-Gichtgasreinigung . . . . .	128
4.5.2.3	Konverteranlagen . . . . .	131
4.5.3	Nichteisen-Metallhütten . . . . .	132
4.5.4	Glaswannen . . . . .	134
4.5.5	Zementwerke . . . . .	135
4.5.6	Elektroabscheider in der thermischen Abfallbehandlung . . . . .	137
4.6	Rauchgaskonditionierung . . . . .	140
4.7	Staubabscheidung unter extremen Temperatur- und Druckbedingungen . . . . .	144
	Symbolverzeichnis . . . . .	146
	Literatur . . . . .	147
5	Filternde Abscheider: E. Schmidt, F. Löffler . . . . .	149
5.1	Einleitung . . . . .	149
5.1.1	Allgemeine Merkmale . . . . .	149
5.1.2	Bereiche und Grenzen der Anwendung . . . . .	150
5.2	Funktionsweise und Betriebsverhalten . . . . .	151
5.2.1	Partikelabscheidung . . . . .	151
5.2.1.1	Vorbemerkung . . . . .	151
5.2.1.2	Abscheidung am Filtermedium . . . . .	151
5.2.1.3	Abscheidung am Filterkuchen . . . . .	156

5.2.2	Druckverlust . . . . .	161
5.2.3	Regenerierung . . . . .	163
5.2.3.1	Regenerierung flexibler Filtermedien . . . . .	163
5.2.3.2	Regenerierung starrer Filtermedien . . . . .	167
5.2.3.3	Regenerierung von Schütttschichten . . . . .	167
5.3	Filtermedien . . . . .	168
5.3.1	Gewebe, Vliese und Filze . . . . .	168
5.3.2	Sinterschichten . . . . .	173
5.3.3	Faser- und Kornkeramiken . . . . .	173
5.3.4	Schüttungen . . . . .	174
5.4	Bauformen und Betriebsweise . . . . .	174
5.4.1	Schlauchfilter . . . . .	174
5.4.2	Taschenfilter . . . . .	180
5.4.3	Sinterlamellenfilter . . . . .	182
5.4.4	Patronenfilter . . . . .	182
5.4.5	Kassettenfilter . . . . .	184
5.4.6	Schütttschichtfilter . . . . .	185
5.4.7	Heißgasfilter . . . . .	188
5.5	Auslegung und Dimensionierung . . . . .	189
5.5.1	Vorbemerkung und allgemeine Kriterien . . . . .	189
5.5.2	Empirische Näherungsgleichungen . . . . .	190
5.5.3	Modellansätze . . . . .	191
5.5.4	Methode der Tabellen und Kennwerte . . . . .	194
5.5.5	Laborversuche und Pilotfilteranlagen . . . . .	195
5.6	Problemfälle und Lösungsvorschläge . . . . .	196
5.6.1	Einführung . . . . .	196
5.6.2	Filteranströmgeschwindigkeit . . . . .	197
5.6.3	Regenerierungshäufigkeit . . . . .	198
5.6.4	Zyklisches Precoatieren . . . . .	199
5.6.5	Rohgaskonditionierung . . . . .	199
	Symbolverzeichnis . . . . .	201
	Literatur . . . . .	202
6	Naßabscheider: E. Muschelknautz, G. Hägele, U. Muschelknautz . . . . .	203
6.1	Die fünf Wäschergruppen . . . . .	203
6.2	Optimaldiagramm . . . . .	207
6.3	Verteilungsgesetze von Stäuben und Tropfen . . . . .	211
6.4	Tropfengrößenverteilungen . . . . .	212
6.5	Abscheidung von Staubteilchen an Einzeltropfen . . . . .	215
6.6	Die Reinigungskenngröße $m$ und der Druckverlust der Tropfen . . . . .	217
6.7	Berechnung eines Wäschers . . . . .	220
6.8	Andere Wäscher . . . . .	223
6.9	Praktische Gesichtspunkte . . . . .	226
	Symbolverzeichnis . . . . .	227
	Literatur . . . . .	228

7	Neue Geräte und Verfahren zur Staubabscheidung: H. Brauer . . . . .	230
7.1	Aufgabenstellung . . . . .	230
7.2	Staubabscheidung in einer Kombination von Faserfilter und Elektrofilter . . . . .	232
7.2.1	Einleitung . . . . .	232
7.2.2	Beschreibung des Filtermediums . . . . .	233
7.2.2.1	Allgemeine Anforderungen . . . . .	233
7.2.2.2	Eigenschaften des Filtermediums . . . . .	234
7.2.3	Eigenschaften des verwendeten Staubes . . . . .	237
7.2.4	Definition von Gesamt- und Fraktionsabscheidegrad . . . . .	240
7.2.5	Beschreibung der Entstaubungsanlage und der Meßeinrichtungen . . . . .	242
7.2.5.1	Aufbau der Entstaubungsanlage . . . . .	242
7.2.5.2	Der Abscheider . . . . .	244
7.2.5.3	Die Staubbosierung . . . . .	246
7.2.5.4	Der Partikelanalysator HC-15 . . . . .	247
7.2.6	Diskussion der Untersuchungsergebnisse . . . . .	249
7.2.6.1	Der Fraktionsabscheidegrad . . . . .	250
7.2.6.2	Der Druckverlust . . . . .	257
7.3	Naßentstaubung in einer Zerstäubungsmaschine . . . . .	265
7.3.1	Einleitung . . . . .	265
7.3.2	Aufbau und Wirkungsweise der Zerstäubungsmaschine . . . . .	266
7.3.3	Berechnung der Tropfenbahnen im Schaufelrad . . . . .	268
7.3.4	Beschreibung der Naßentstaubungsanlage . . . . .	273
7.3.4.1	Weg der Luft durch die Anlage . . . . .	276
7.3.4.2	Weg des Wassers durch die Anlage . . . . .	277
7.3.5	Diskussion der Untersuchungsergebnisse . . . . .	278
7.3.5.1	Der Fraktionsabscheidegrad . . . . .	278
7.3.5.2	Der Grenzkorndurchmesser . . . . .	281
7.3.5.3	Der Leistungsbedarf der Entstaubungsmaschine . . . . .	282
7.3.5.4	Der spezifische Energieaufwand . . . . .	286
7.3.5.5	Abscheideleistung bei Rückführung des Wassers . . . . .	288
7.3.6	Zusammenfassung . . . . .	290
	Literatur . . . . .	291

## Verfahren zur Minderung gasförmiger Schadstoffemissionen

8	Abscheidung gasförmiger Stoffe durch Absorption, Kondensation, Membran-Permeation und Trockensorption: G.-G. Börger . . . . .	295
8.1	Grundlagen: Aufnahme von Gasen in eine flüssige oder feste Phase ggf. zugleich mit chemischer Umwandlung . . . . .	295

8.1.1	Begriffsdefinitionen . . . . .	295
8.1.2	Dampfdruck und Temperatur . . . . .	296
8.1.3	Ideale Lösungen (Raoult'sches Gesetz) . . . . .	298
8.1.4	Reale Lösungen, Beschreibung von Flüssig-Gas-Gleichgewichten . . . . .	298
8.1.5	Bestimmung der Anzahl erforderlicher Stoffübergangs-Einheiten . . . . .	299
8.1.6	Bestimmung der Höhe der Stoffübergangs-Einheiten	305
8.1.7	Druckverlust in Kolonnen . . . . .	317
8.2	Absorbentien . . . . .	318
8.2.1	Absorbentien für physikalische Absorption . . . . .	318
8.2.2	Absorbentien für Chemi- und Elektro-Chemisorption	320
8.2.3	Weiterverwendung, Aufarbeitung oder Entsorgung von Absorbaten . . . . .	323
8.3	Absorber und Absorptionsverfahren . . . . .	327
8.3.1	Wirkungsweisen von Absorbern . . . . .	327
8.3.2	Bauformen von Absorbern . . . . .	328
8.3.3	Absorptions-Verfahren für die Abgasreinigung . . .	334
8.4	Kondensation . . . . .	341
8.4.1	Teilkondensation von Dämpfen aus Abluft . . . . .	341
8.4.2	Zusammenwirken von Kondensation und Absorption	342
8.4.3	Kondensations-Verfahren für die Abgasreinigung . .	344
8.5	Membranpermeation . . . . .	347
8.5.1	Diffusion, Adsorption, Absorption und Quellung in Membranen . . . . .	347
8.5.2	Membran-Aufbau, Membran-Werkstoffe und Membran-Module . . . . .	350
8.5.3	Membran-Verfahren für die Abgasreinigung . . . . .	352
8.6	Trockensorption . . . . .	355
8.6.1	Diffusion, Adsorption, Absorption und Reaktion . .	355
8.6.2	Trockensorptions-Verfahren . . . . .	357
	Symbolverzeichnis . . . . .	357
	Literatur . . . . .	359
9	Abgasbehandlung in Stoffaustauschmaschinen:	
	H. Brauer . . . . .	362
9.1	Einleitung . . . . .	362
9.2	Einige wissenschaftliche Grundlagen . . . . .	363
9.2.1	Der Stoffstrom durch die Phasengrenzfläche . . . . .	363
9.2.2	Die Phasengrenzfläche . . . . .	364
9.2.3	Der Stofftransportkoeffizient . . . . .	364
9.2.3.1	Definition des Stofftransportkoeffizienten . . . . .	364
9.2.3.2	Stofftransportwiderstand in der Partikel . . . . .	365
9.2.3.3	Stofftransportwiderstand in dem umgebenden Fluid . . . . .	368
9.2.4	Schlußfolgerungen aus den theoretischen Untersuchungen . . . . .	370

9.3	Stoffaustauschmaschine mit periodisch wiederholter Tropfenbildung . . . . .	370
9.3.1	Aufbau und Wirkungsweise der Maschine . . . . .	370
9.3.2	Beschreibung des Absorptionsprozesses bei Gleichstrom von Gas und Flüssigkeit . . . . .	372
9.3.3	Diskussion einiger Ergebnisse für die Absorption in der Stoffaustauschmaschine . . . . .	374
9.3.3.1	Versuchsbedingungen . . . . .	374
9.3.3.2	Einfluß der Volumenströme von Gas und Flüssigkeit . . . . .	376
9.3.3.3	Einfluß der SO <sub>2</sub> -Konzentration des Gases . . . . .	378
9.3.3.4	Einfluß der Drehzahl und der Strömungsrichtung des Gases . . . . .	379
9.3.4	Vergleich der Leistung der Zerstäubungsmaschine mit der anderer Absorptionsgeräte . . . . .	381
9.3.5	Stoffaustauschmaschine mit periodisch wiederholter Blasenbildung . . . . .	384
9.3.5.1	Aufbau und Wirkungsweise der Maschine . . . . .	384
9.3.5.2	Energieübertragung in einer Stufe . . . . .	388
9.3.5.3	Gasgehalt einer Stufe . . . . .	392
9.3.5.4	Stoffaustausch in den drei Stufen der Maschine . . . . .	393
9.3.5.5	Vergleich des Stofftransportes in verschiedenen Geräten . . . . .	397
	Literatur . . . . .	399
10	Abscheidung gasförmiger Schadstoffe durch Adsorption und Adsorptionskatalyse: H. Menig, H. Krill . . . . .	400
10.1	Einleitung . . . . .	400
10.2	Geschichtlicher Rückblick . . . . .	400
10.3	Grundlagen der Adsorption und Adsorptionskatalyse . . . . .	402
10.3.1	Wesen und Grundbegriffe . . . . .	402
10.3.2	Adsorptive Trenneffekte . . . . .	404
10.3.3	Adsorptionskapazität . . . . .	405
10.3.4	Kinetik der Adsorption . . . . .	408
10.3.5	Adsorptionswärme . . . . .	410
10.3.6	Regenerierung beladener Adsorbentien . . . . .	411
10.3.6.1	Regenerierung mit Desorption in die Gasphase . . . . .	411
10.3.6.2	Regenerierung mit Desorption in die flüssige Phase . . . . .	413
10.3.6.3	Regenerierung mit reaktivierender Desorption . . . . .	415
10.4	Technische Adsorbentien . . . . .	415
10.4.1	Charakterisierung nach Rohstoff und Herstellung . . . . .	415
10.4.1.1	Kohlenstoffadsorbentien . . . . .	415
10.4.1.2	Oxidische Adsorbentien . . . . .	416
10.4.1.3	Polymeradsorbentien . . . . .	420
10.4.1.4	Imprägnierte Adsorbentien . . . . .	420
10.4.2	Technisch bedeutsame Eigenschaften der Adsorbentien . . . . .	421



10.4.2.1	Spezifische innere Oberfläche . . . . .	421
10.4.2.2	Porenvolumen und Porenradienverteilung . . . . .	422
10.4.2.3	Adsorptions-Charakteristik . . . . .	425
10.4.2.4	Katalytische Eigenschaften . . . . .	427
10.4.2.5	Korngrößenverteilung . . . . .	427
10.4.2.6	Dichte und Porosität . . . . .	428
10.4.2.7	Mechanische und chemische Beständigkeit . . . . .	429
10.4.3	Auswahlkriterien für Adsorbentien zur Abscheidung gasförmiger Schadstoffe . . . . .	429
10.5	Bewertung der zu adsorbierenden gasförmigen Stoffe . . . . .	430
10.6	Adsorberbauarten . . . . .	431
10.6.1	Festbettadsorber . . . . .	431
10.6.2	Bewegtbettadsorber . . . . .	433
10.6.3	Rotoradsorber . . . . .	433
10.6.4	Flugstromadsorber . . . . .	434
10.7	Anwendungsgebiete . . . . .	434
10.7.1	Lösemittelabscheidung mit und ohne Rück- gewinnung . . . . .	435
10.7.2	Lösemittelverarbeitende Industrien . . . . .	435
10.7.2.1	Festbettverfahren mit Wasserdampfdesorption . . . . .	436
10.7.2.2	Festbettverfahren mit Heißgasdesorption . . . . .	441
10.7.2.3	Bewegtbettverfahren mit Heißgas- oder Wasserdampfdesorption . . . . .	443
10.7.2.4	Adsorber mit rotierenden Einbauten und Heißgasdesorption . . . . .	449
10.7.3	Abluftreinigung bei Tankanlagen und Umfüllstationen . . . . .	450
10.7.4	Reinigung von Viskose-Abluft . . . . .	454
10.7.5	Entschwefelung von Claus-Abgasen . . . . .	456
10.7.6	Minderung von SO <sub>2</sub> -Emissionen . . . . .	457
10.7.7	Emissionsminderung bei Geruchs- und Giftstoffen . . . . .	461
10.7.8	Abscheidung von Quecksilber . . . . .	463
10.7.9	Abscheidung von Dioxinen . . . . .	464
10.7.10	Abscheidung von Phenol und Formaldehyd . . . . .	465
10.7.11	Minderung von NO <sub>x</sub> -Emissionen . . . . .	467
10.7.12	Abscheidung radioaktiver Gase . . . . .	469
	Literatur . . . . .	471
11	Abbau von Dioxinen und Furanen in Abgasen mit Wasserstoffperoxid: C. Weber-Ruhl, U. Schelbert . . . . .	473
11.1	Einleitung . . . . .	473
11.1.1	Die Gruppe der Dioxine . . . . .	474
11.1.2	Dioxin-Quellen . . . . .	475
11.2	Generelle Emissionsminderungsmaßnahmen . . . . .	475
11.2.1	Einsatzstoffbezogene Primärmaßnahmen . . . . .	475

11.2.2	Prozeßtechnische Primärmaßnahmen . . . . .	476
11.2.3	Dioxinminderung im Abgasweg . . . . .	476
11.2.4	Anwendung von Abgasreinigungsverfahren . . . . .	477
11.3	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Oxidationsverfahren . . . . .	478
11.3.1	Eigenschaften und Anwendung von Wasserstoffperoxid im Umweltschutz . . . . .	478
11.3.2	Versuche an einer Müllverbrennungsanlage . . . . .	480
11.3.2.1	Versuchsbeschreibung . . . . .	480
11.3.2.2	V Versuchsergebnisse . . . . .	482
11.3.3	Versuche an einer Metallschrott-Recycling-Anlage . . . . .	484
11.3.3.1	Versuchsbeschreibung . . . . .	484
11.3.3.2	V Versuchsergebnisse . . . . .	485
11.3.4	DeDIOX®-Anlagenkonzept . . . . .	486
11.3.4.1	Allgemeines . . . . .	486
11.3.4.2	Lagerung und Dosierung von Wasserstoffperoxid . . . . .	489
11.3.5	Wasserstoffperoxid-Vormischung . . . . .	489
11.3.6	Dedioxinierung . . . . .	490
11.3.7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung . . . . .	490
11.3.8	Schlußbemerkung . . . . .	492
12	Abscheidung gasförmiger Schadstoffe durch katalytische Reaktionen: T. Schmidt . . . . .	493
12.1	Grundlagen des Katalysatoreinsatzes zur Luftreinhaltung . . . . .	493
12.1.1	Administrative Randbedingungen und deren technische sowie wirtschaftliche Konsequenzen . . . . .	493
12.1.2	Reaktionstechnische Grundlagen . . . . .	497
12.1.2.1	Katalytische Reaktionen . . . . .	497
12.1.2.2	Teilschritte heterogen katalysierter Reaktionen . . . . .	499
12.1.2.3	Transportvorgänge . . . . .	501
12.1.2.4	Prozeßberechnung . . . . .	503
12.1.3	Katalysatoren für die Abgasreinigung und deren Handhabung . . . . .	510
12.1.3.1	Anforderungen an Abgasreinigungskatalysatoren . . . . .	510
12.1.3.2	Einteilung technischer Abgasreinigungskatalysa- toren . . . . .	512
12.1.3.3	Beeinflussung der Katalysatorstandzeit . . . . .	516
12.1.4	Anlagenkonzepte . . . . .	524
12.1.4.1	Grundfließbild katalytischer Abgasreinigungs- verfahren . . . . .	524
12.1.4.2	Reaktortypen . . . . .	525
12.1.4.3	Wärmeübertragung . . . . .	527
12.1.4.4	Verfahrenskombinationen . . . . .	528
12.2.	Katalytische Oxidationsverfahren . . . . .	529
12.2.1	Nichtselektive Verfahren . . . . .	529
12.2.1.1	Reaktionsmechanismen der katalytischen Totaloxidation und Katalysatorbeispiele . . . . .	529

12.2.1.2	Katalytische Totaloxidation organischer Lösemittel . . . . .	531
12.2.1.3	Katalytische Totaloxidation zur Reinhaltung von Abgasen partieller Oxidationsverfahren . . . . .	543
12.2.1.4	Katalytische Totaloxidation zur Reinigung von Raffinerieabgasen . . . . .	549
12.2.1.5	Anwendung von Edelmetallkatalysatoren zur Reinigung von Dieselmotorabgasen . . . . .	550
12.2.2	Selektive Oxidationsverfahren . . . . .	552
12.2.2.1	Anwendung von Platinkatalysatoren zur $\text{NH}_3$ -Oxidation . . . . .	552
12.2.2.2	Anwendung von $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Katalysatoren zur selektiven Oxidation von Schwefelverbindungen bei der Reinigung von Claus-Anlagen-Abgasen . . . . .	556
12.3	Katalytische Reduktionsverfahren . . . . .	560
12.3.1	Nichtselektive Stickoxid-Reduktion . . . . .	560
12.3.1.1	Reaktionsverlauf an Platinkatalysatoren . . . . .	560
12.3.1.2	Anwendung von Platinkatalysatoren zur Abgasreinigung bei der Salpetersäureherstellung . . . . .	560
12.3.2	Selektive Stickoxidreduktion . . . . .	561
12.3.2.1	Reaktionsverlauf an Vanadiumoxid-Katalysatoren . . . . .	561
12.3.2.2	Anwendung zur Rauchgasreinigung . . . . .	564
12.3.2.3	Anwendung bei Stationärmotoren . . . . .	568
12.4	Katalytische Zersetzungsreaktionen . . . . .	571
12.4.1	Auftreten von Ozon als Emission . . . . .	571
12.4.2	Reaktionen . . . . .	571
12.4.2.1	Oxidationsreaktionen . . . . .	571
12.4.2.2	Katalytische Zersetzung . . . . .	572
12.5	Simultanverfahren . . . . .	572
12.5.1	Abgasreinigung für Otto-Motoren mit dem Dreiwegesystem . . . . .	572
12.5.1.1	Reaktionsverlauf und Katalysatoren . . . . .	572
12.5.1.2	Verfahrensbeschreibung . . . . .	575
12.5.2	Simultane Abscheidung von Schwefeldioxid und Stickoxiden an Aktivkokskatalysatoren . . . . .	577
12.5.2.1	Reaktionsverlauf und Katalysatorbeschreibung . . . . .	577
12.5.2.2	Verfahrensbeschreibung der Anwendung zur Rauchgasreinigung . . . . .	578
12.6	Adsorptionskatalyse . . . . .	579
12.6.1	Chemisorption von Schwefeltrioxid . . . . .	579
12.6.1.1	Reaktionsverlauf und Katalysatoren . . . . .	579
12.6.1.2	Verfahrensbeschreibung zur Rauchgasreinigung . . . . .	580
12.6.2	Physikalische Adsorption von Elementarschwefel . . . . .	581
12.6.2.1	Reaktionsführung beim Claus-Verfahren . . . . .	581
12.6.2.2	Reaktionsführung beim Sulfreen-Verfahren . . . . .	582
12.6.2.3	Umwandlung von COS und $\text{CS}_2$ : Hydrosulfreen-Verfahren . . . . .	584

12.6.2.4	Erhöhung der Umsatzgrade durch katalytische Direktoxidation: CarbosulfreenVerfahren . . . . .	586
12.7	Beschreibung des Katalysatorrecycling am Beispiel von Autoabgaskatalysatoren . . . . .	586
12.7.1	Zielsetzung . . . . .	586
12.7.2	Konzept und Prozeßschritte des Autoabgaskatalysator-Recycling . . . . .	588
12.7.3	Ausblick und Bedeutung des Recyclingprinzips . . .	589
	Symbolverzeichnis . . . . .	590
	Abkürzungen und Indices . . . . .	591
	Literatur . . . . .	592
13	Abscheidung gasförmiger Schadstoffe durch biologische Reaktionen: K. Fischer, F. Sabo	595
13.1	Einleitung . . . . .	595
13.2	Verfahrenstechnische Grundlagen . . . . .	596
13.2.1	Allgemeines . . . . .	596
13.2.2	Großräumige Transportprozesse . . . . .	597
13.2.3	Schadstoffaufnahme durch Sorption . . . . .	597
13.2.3.1	Übersicht . . . . .	597
13.2.3.2	Adsorption . . . . .	597
13.2.3.3	Absorption . . . . .	598
13.2.4	Grundlagen des Stoffübergangs . . . . .	599
13.2.5	Modell für den Stofftransport . . . . .	600
13.2.6	Kinetik enzymkatalysierter Reaktionen . . . . .	602
13.3	Mikrobiologische Grundlagen . . . . .	605
13.3.1	Einleitung . . . . .	605
13.3.2	Abbauverhalten von Abluftinhaltsstoffen . . . . .	606
13.3.3	Beteiligte Mikroorganismen . . . . .	607
13.3.4	Beeinflussende Faktoren . . . . .	608
13.4	Grundlagen der Olfaktometrie . . . . .	614
13.5	Biowäscher . . . . .	616
13.5.1	Allgemeines . . . . .	616
13.5.2	Verfahrensbeschreibung . . . . .	620
13.5.3	Auslegung . . . . .	622
13.5.4	Bauformen . . . . .	623
13.5.5	Anwendungsbeispiel . . . . .	624
13.6	Biofilter . . . . .	625
13.6.1	Strömungsprozesse . . . . .	626
13.6.2	Filtermaterial . . . . .	631
13.6.3	Filterfeuchte . . . . .	632
13.6.4	Aufbau und Verfahrensvarianten . . . . .	633
13.6.5	Dimensionierung . . . . .	637
13.7	Neue Verfahren . . . . .	638
13.7.1	Bereich Biofilter . . . . .	638
13.7.2	Bereich Biowäscher . . . . .	640
13.7.3	Biomembranverfahren . . . . .	641

13.8	Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung	
	biologischer Verfahren . . . . .	641
	Literatur . . . . .	642

## **Verfahren zur Minderung von Schadstoffemissionen als Folge von Explosionen**

14	Explosionen und Emissionen: N. Jaeger . . . . .	649
14.1	Einleitung . . . . .	649
14.2	Sicherheitstechnische Kenngrößen . . . . .	650
14.2.1	Prüfpflicht . . . . .	650
14.2.2	Abgelagerter Staub . . . . .	650
14.2.2.1	Brennverhalten . . . . .	650
14.2.2.2	Relative Selbstentzündungstemperatur . . . . .	651
14.2.2.3	Selbstentzündungstemperatur (Warmlagerversuche im Drahtkorb) . . . . .	651
14.2.2.4	Relative Zersetzungstemperatur . . . . .	651
14.2.2.5	Spontane Zersetzungsfähigkeit . . . . .	652
14.2.2.6	Schlagempfindlichkeit . . . . .	652
14.2.3	Aufgewirbelter Staub . . . . .	653
14.2.3.1	Maximaler Explosionsüberdruck $P_{\max}$ und maximaler zeitlicher Druckanstieg $(dP/dt)_{\max}$ , Explosionsgrenzen EG . . . . .	653
14.2.3.2	Sauerstoffgrenzkonzentration SGK . . . . .	654
14.2.3.3	Mindestzündenergie MZE . . . . .	654
14.2.3.4	Mindestzündtemperatur MZT . . . . .	655
14.2.3.5	Hybride Gemische . . . . .	655
14.3	Explosionsschutz . . . . .	656
14.3.1	Vorbeugender Explosionsschutz . . . . .	656
14.3.1.1	Vermeiden von explosionsfähigen Brennstoff/ Luft-Gemischen . . . . .	657
14.3.1.2	Vermeiden von Explosionen durch Inertisierung . . . . .	658
14.3.1.3	Vermeiden von wirksamen Zündquellen . . . . .	658
14.3.1.4	Konsequenzen für die Praxis . . . . .	660
14.3.1.5	Elektrostatische Zündquellen . . . . .	661
14.3.2	Konstruktiver Explosionsschutz . . . . .	662
14.3.2.1	Explosionsfeste Bauweise . . . . .	662
14.3.2.2	Explosionsentlastung . . . . .	663
14.3.2.3	Explosionsunterdrückung . . . . .	664
14.3.3	Explosionsentkoppelung . . . . .	665
	Abkürzungen . . . . .	669
	Literatur . . . . .	669
	Sachverzeichnis . . . . .	671