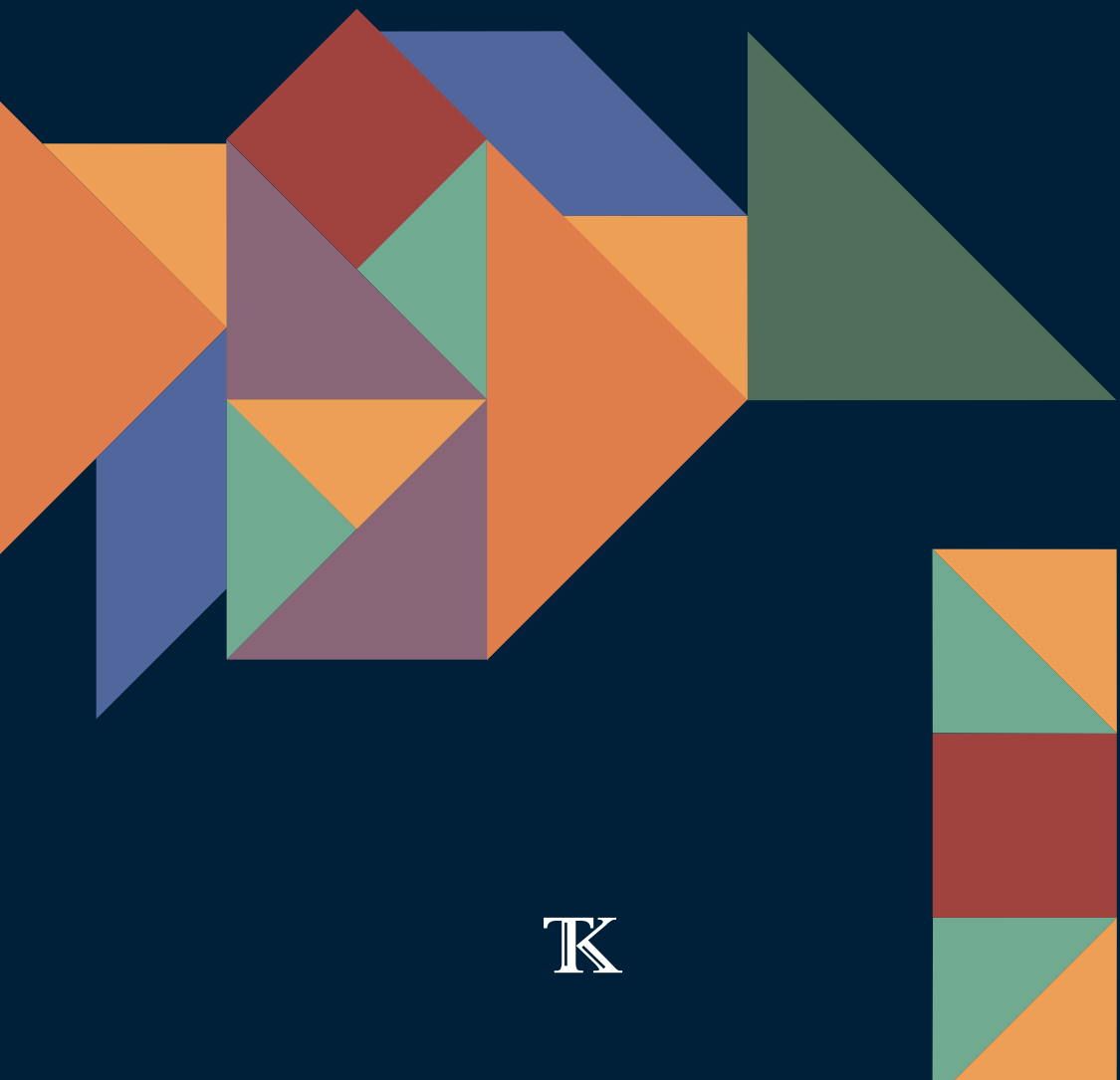
Margit Löschau

REINIGUNG VON ABGASEN

– unter besonderer Berücksichtigung
der thermischen Abfallbehandlung –



Für meine Eltern

Margit Löschau

Reinigung von Abgasen

– unter besonderer Berücksichtigung
der thermischen Abfallbehandlung –

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.dnb.de abrufbar

Margit Löschau: **Reinigung von Abgasen**
– unter besonderer Berücksichtigung
der thermischen Abfallbehandlung –

ISBN 978-3-944310-13-8 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2014
Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Margit Löschau, Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Erfassung und Layout: Ginette Teske, Berenice Gellhorn, Sandra Peters, Janin Burbott
Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so können der Verlag und die Autorin keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Vorwort

Dr. Margit Löschau hat sich nach ihrem Studium und ihrer Promotion am Institut für Technischen Umweltschutz der Technischen Universität Berlin unter anderem intensiv mit der Problematik der Abgase aus Abfallverbrennungsanlagen und deren Behandlung auseinandergesetzt.

Mit ihrem hier vorgelegten Buch, das u.a. ein Ergebnis ihrer Arbeiten ist, legt sie einen ebenso breiten Überblick wie auch eine vertiefte Betrachtung der mit den Abgasen verbundenen Problemfelder vor, wobei sie den Schwerpunkt auf die zielgerichtete Untersuchung der Instrumente zu umweltverträglichen Lösungen der Probleme legt.

Zunächst setzt sie sich ausführlich mit der Herkunft und Wirkung der für Atmosphäre und Klima wesentlichen Schadstoffe auseinander und gibt damit die Richtung für den Rahmen ihrer Untersuchung und die Lösung der mit der Abgasbehandlung verbundenen Probleme vor.

Erläutert werden eingangs sowohl einschlägige europäische und deutsche Rechtsnormen als auch technische Richtlinien und Normen. Verglichen werden die in Industrieländern geltenden Emissionsgrenzwerte für in Abgasen vorkommende Schadstoffe.

Ein Schwerpunkt dieses Teils der Untersuchung ist die Entstehung von Schadstoffen und deren Reduzierung durch Primärmaßnahmen im Verbrennungsprozess.

Das nächste Kapitel ist den chemischen und physikalischen Grundlagen der Schadstoffminderung gewidmet; im Folgenden werden Sekundärmaßnahmen zur Minderung partikelförmiger Schadstoffe, von Stickoxiden sowie von organischen und sauren Inhaltsstoffen dargestellt.

Ausführlich werden Verfahren zur Abgasreinigung und – soweit notwendig – zur Abwasserreinigung sowie die zugehörigen Messungen und Analysen betrachtet.

Flüssige und feste Rückstände aus unterschiedlichen Abgasreinigungsverfahren sowie deren Behandlung und Entsorgung stellt die Autorin ausführlich dar und bewertet sie.

Aus den Darstellungen von Grundlagen und Ansätzen zur Lösung einzelner Probleme werden Gesamtkonzepte zur Abgasbehandlung entwickelt und ausführlich beschrieben.

Verdienstvoll sind auch die ausführlichen Quellenverzeichnisse zum Ende jeden Kapitels, wodurch vertiefende Untersuchungen über einzelne Problemfelder erleichtert werden.

Dieses Buch ist seit langem die erste ausführliche und weitgehend vollständige Abhandlung über wichtige Aspekte der Luftreinhaltung zum Schutz von Atmosphäre und Klima.

Dieses umfassende Werk der durch Forschung und Praxis als kompetent ausgewiesenen Autorin ist eine wichtige Informationsquelle für alle, die sich aus Gründen der Ausbildung und ihrer beruflichen Tätigkeit mit der Behandlung von Abgasen befassen.

Ich empfehle dieses Buch Lehrenden und Lernenden des Umweltschutzes sowie den Praktikern der entsprechenden Gebiete.

Neuruppin, November 2014

Professor Dr. Dr. Karl J. Thomé-Kozmiensky



Die Autorin
Dr. Margit Löschau

Margit Löschau wurde 1978 in Berlin geboren und studierte Technischen Umweltschutz an der Technischen Universität Berlin. Anschließend arbeitete sie dort als wissenschaftliche Mitarbeiterin und promovierte im Jahr 2006 mit Auszeichnung zur Doktorin der Ingenieurwissenschaften am Fachgebiet Abfallwirtschaft bei Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky und Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter. Danach war sie acht Jahre als Projektleiterin und -ingenieurin bei der Pöyry Deutschland GmbH in der technischen Beratung und Anlagenplanung im In- und Ausland tätig. In dieser Zeit spezialisierte sie sich auf dem Gebiet der Abgasreinigung. Seit 2012 doziert sie als Lehrbeauftragte an der Technischen Universität Berlin für das Fach „Technik der Luftreinhaltung“. Seit 2014 ist sie Geschäftsführerin der Fa. Wandschneider + Gutjahr in Hamburg, einem Ingenieurbüro mit Schwerpunkt im Bereich der Planung und Erneuerung von thermischen Behandlungsanlagen für Abfall, Klärschlamm und Biomasse.

Inhaltsverzeichnis

Einführung 1

1. Herkunft und Wirkung von Luftschadstoffen 3

1.1. Natürliche Zusammensetzung der Luft 6
1.2. Staub 7
1.3. Kohlenstoffmonoxid 9
1.4. Organische Schadstoffe 10
1.4.1. Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane 10
1.4.2. Polychlorierte Biphenyle 13
1.4.3. Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe 14
1.5. Stickstoffoxide 16
1.6. Halogenwasserstoffe 18
1.7. Schwefeloxide 19
1.8. Schwermetalle 20
1.9. Quellenverzeichnis 24

2. Rechtliche Anforderungen an die Abgasbehandlung 27

2.1. Europäisches Recht 29
2.1.1. Richtlinie über Industrieemissionen 29
2.1.2. Merkblätter zur besten verfügbaren Technik 36
2.2. Deutsches Recht 39
2.2.1. Bundes-Immissionsschutzgesetz 39
2.2.1.1. Siebzehnte Bundes-Immissionsschutzverordnung 40
2.2.1.2. Dreizehnte Bundes-Immissionsschutzverordnung 46
2.2.1.3. Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft 46
2.2.2. Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz 49
2.2.3. Normen und Richtlinien 51
2.2.3.1. Richtlinie VDI 3460 Emissionsminderung 51
2.2.3.2. Bundeseinheitliche Praxis bei der Überwachung der Emissionen 51
2.2.3.3. DIN EN 15259 Messung von Emissionen aus stationären Quellen 53
2.3. Vergleich der Emissionsgrenzwerte verschiedener Länder 53
2.4. Quellenverzeichnis 53

3. Schadstoffentstehung im Verbrennungsprozess und Primärmaßnahmen zur Reduzierung 57

3.1. Staub 60
3.2. Kohlenstoffmonoxid und organisch gebundener Kohlenstoff 62
3.3. Organische Schadstoffe 64
3.3.1. Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane 64
3.3.2. Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe 66
3.4. Stickstoffoxide 67
3.4.1. Bildungsmechanismen 67
3.4.1.1. Brennstoff-NO_x 69
3.4.1.2. Thermisches NO_x 73
3.4.1.3. Promptes NO_x 73
3.4.2. Feuerungstechnische Maßnahmen zur Reduzierung 73
3.4.2.1. Luftstufung 74
3.4.2.2. Abgasrezirkulation 75
3.4.2.3. Low-NO_x-Brenner 76
3.5. Saure Schadgase 78
3.6. Schwermetalle 79
3.7. Typische Rohgaszusammensetzungen 84
3.8. Quellenverzeichnis 85

4. Chemische und physikalische Grundlagen der Schadstoffminderung 91

4.1. Grundlagen der Abscheidung partikelförmiger Schadstoffe 93
4.1.1. Fliehkraft 94
4.1.2. Elektrische Anziehungskraft 94
4.1.3. Filtration 95
4.1.4. Heterokoagulation 98
4.2. Grundlagen der Abscheidung gasförmiger Schadstoffe 99
4.2.1. Homogene Gasphasenreaktion 99
4.2.2. Sorption 99
4.2.2.1. Adsorption 99
4.2.2.2. Absorption 103
4.2.3. Katalyse 106
4.3. Quellenverzeichnis 109

5. Sekundärmaßnahmen zur Minderung partikelförmiger Schadstoffe 111

5.1. Massenkraftabscheider 114
5.1.1. Schwerkraftabscheider 114
5.1.2. Fliehkraftabscheider 116
5.2. Elektrische Abscheider 121
5.2.1. Trockenelektrofilter 121
5.2.2. Nasselektrofilter 129
5.3. Filternde Abscheider 134
5.3.1. Faserschichtfilter (Gewebefilter) 135
5.3.1.1. Verfahrensprinzip 135
5.3.1.2. Filterbauformen 137
5.3.1.3. Filterelemente 139
5.3.1.4. Abreinigung 143
5.3.1.5. Filterkenngrößen 145
5.3.2. Schüttschichtfilter 146
5.4. Nassabscheider 147
5.5. Quellenverzeichnis 148

6. Sekundärmaßnahmen zur Minderung von Stickstoffoxiden 151

6.1. Reaktionsmittel 153
6.1.1. Ammoniakwasser 154
6.1.2. Harnstofflösung 156
6.2. Selektives nichtkatalytisches Reduktionsverfahren (SNCR) 157
6.2.1. Verfahrensprinzip 157
6.2.2. Eindüstechnik 161
6.2.3. Unterschiede von Ammoniak- und Harnstoff-SNCR 167
6.2.4. Optimierungsmaßnahmen 170
6.2.5. Ammoniakeinbindung in die Rückstände 175
6.3. Selektives katalytisches Reduktionsverfahren (SCR) 176
6.3.1. Verfahrensprinzip 176
6.3.2. Anlagenschaltungen 177
6.3.2.1. High-Dust-Rohgas-SCR 179
6.3.2.2. Low-Dust-Rohgas-SCR 179

6.3.2.3. Tail-End-SCR 179
6.3.3. Eindüsung des Reduktionsmittels 180
6.3.4. Katalysatorsystem 181
6.3.5. Katalysatoraufbau und -bauformen 184
6.3.6. Katalysatorkenngrößen 187
6.3.6.1. Aktivität 187
6.3.6.2. Stabilität 191
6.3.6.3. Selektivität 194
6.3.7. Nebenreaktionen 195
6.3.7.1. Bildung von Schwefeltrioxid und Schwefelsäure 195
6.3.7.2. Bildung von Ammoniumsalzen 195
6.3.7.3. Oxidation von Quecksilber 198
6.3.7.4. Oxidation von organischen Schadstoffen 199
6.4. Kombinationsverfahren 199
6.5. Quellenverzeichnis 200

7. Sekundärmaßnahmen zur Minderung organischer Schadstoffe sowie dampfförmiger Schwermetalle 205

7.1. Adsorptionsverfahren 207
7.1.1. Physikalische Adsorptionsmittel 207
7.1.1.1. Kohlenstoffhaltige Adsorptionsmittel 208
7.1.1.1.1. Aktivkohle 208
7.1.1.1.2. Aktivkoks 209
7.1.1.1.3. Sicherheitstechnische Aspekte 212
7.1.1.2. Mineralische Adsorptionsmittel 215
7.1.1.2.1. Zeolithe 215
7.1.1.2.2. Bentonite 216
7.1.1.3. Sonstige Adsorptionsmittel 217
7.1.2. Fest- und Wanderbett-Verfahren 218
7.1.3. Flugstrom-Filterschicht-Verfahren 225
7.2. Absorptionsverfahren für Quecksilber 228
7.3. Oxidationskatalysator für polychlorierte Dibenzodioxine und -furane 228
7.4. Quellenverzeichnis 229

8. Sekundärmaßnahmen zur Minderung saurer Schadgase..... 231

8.1. Sorptionsmittel 235
8.1.1. Natriumbasierte Sorptionsmittel 235
8.1.1.1. Natriumhydrogencarbonat 236
8.1.1.2. Natronlauge 237
8.1.2. Calciumbasierte Sorptionsmittel 237
8.1.2.1. Kalkstein 238
8.1.2.2. Branntkalk 239
8.1.2.3. Kalkhydrat 243
8.1.2.4. Spezialkalkhydrate 243
8.1.3. Mischsorbentien 246
8.2. Nassverfahren 246
8.2.1. Verfahrensprinzip 246
8.2.2. Wäscherbauarten 249
8.2.2.1. Sprühturmwäscher 251
8.2.2.2. Füllkörperwäscher 252
8.2.3. Notwendige Abgasvorbehandlung 253
8.2.4. Saure Wäsche 253
8.2.5. Neutrale Wäsche 255
8.2.5.1. Physikalische Absorption von Schwefeldioxid 255
8.2.5.2. Sulfat-Bildung 256
8.2.5.3. Chemische Absorption von Schwefeldioxid 257
8.2.5.3.1. Kalksteinwäscher 257
8.2.5.3.2. Kalkmilchwäscher 260
8.2.5.3.3. Natronlaugewäscher 261
8.2.5.3.4. Sonstige neutrale Wäscher 262
8.2.6. Abscheidung anderer Schadstoffe im Wäschersystem 264
8.2.6.1. Abscheidung von chloridischem Quecksilber 264
8.2.6.1.1. Absorption im sauren Wäscher 264
8.2.6.1.2. Oxidation von elementarem Quecksilber 264
8.2.6.1.3. Neubildung von elementarem Quecksilber 265
8.2.6.1.4. Adsorption an kohlenstoffhaltigen Adsorptionsmitteln 265
8.2.6.2. Abscheidung von Schwefeltrioxid 265
8.2.6.3. Abscheidung von Dioxinen und Furanen 266
8.2.6.4. Abscheidung von partikelförmigen Schadstoffen und Aerosolen 266
8.2.6.5. Abscheidung von Ammoniak 266
8.2.7. Notwendige Abgasnachbehandlung 267
8.2.8. Abwasserbehandlung 267

8.2.8.1. Abwasserreinigung....268
8.2.8.1.1. Fällungssystem....268
8.2.8.1.2. Abtrennung ausgefällter Verbindungen aus dem Abwasser....270
8.2.8.2. Produktgewinnung aus flüssigen Rückständen....271
8.2.8.2.1. Salzsäuregewinnung....271
8.2.8.2.2. Gipsgewinnung....272
8.2.8.3. Abwassereindampfung....273
8.3. Quasitrockene Verfahren....274
8.3.1. Verfahrensprinzip....274
8.3.2. Abgaskonditionierung....275
8.3.3. Sorption saurer Schadgase....277
8.3.4. Reaktorsystem....279
8.3.4.1. Sprühabsorptionsverfahren....280
8.3.4.1.1. Sprühabsorber mit Rotationszerstäuber....284
8.3.4.1.2. Sprühabsorber mit Zweistoffdüsen....286
8.3.4.2. Konditioniert-trockene Verfahren....287
8.3.4.2.1. Konditionierungseinheit....288
8.3.4.2.2. Reaktorbauarten....291
8.4. Trockenverfahren....294
8.4.1. Verfahrensprinzip....294
8.4.2. Trockenverfahren auf Basis von Kalkhydrat....294
8.4.3. Trockenverfahren auf Basis von Natriumhydrogencarbonat....298
8.4.4. Reaktorbauarten....301
8.5. Direktentschwefelung....302
8.6. Kombinationsverfahren....306
8.7. CFD-Simulation zur Anlagenoptimierung....308
8.8. Quellenverzeichnis....309

9. Emissionen und Emissionsüberwachung.... 313

9.1. Diskontinuierliche Emissionsmessung....315
9.1.1. Anforderungen an die Messung....316
9.1.1.1. Messstrecke....317
9.1.1.2. Messplatz....318
9.1.1.3. Messaufgabe....319
9.1.1.4. Messstrategie....319

9.1.1.5. Messplan 319
9.1.1.6. Messbericht 320
9.1.2. Verfahren zur manuellen diskontinuierlichen Emissionsmessung 320
9.1.2.1. Probenahme und Analytik von Staub und staubgebundenen Schwermetallen 321
9.1.2.2. Probenahme und Analytik von polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen 322
9.1.2.3. Probenahme und Analytik von gasförmigen anorganischen Verbindungen 323
9.2. Kontinuierliche Emissionsmessung 324
9.2.1. Zulässige Messunsicherheiten 325
9.2.2. Qualitätssicherung von automatischen Messeinrichtungen 325
9.2.2.1. Einsatz eignungsgeprüfter automatischer Messeinrichtungen (QAL 1) 326
9.2.2.2. Kalibrierung und Validierung automatischer Messeinrichtungen (QAL 2) 327
9.2.2.3. Laufende Qualitätskontrolle der automatischen Messeinrichtung während des Betriebs (QAL 3) 329
9.2.3. Verfahren zur automatischen kontinuierlichen Emissionsmessung 331
9.2.3.1. Aufbauvarianten 332
9.2.3.2. Messung partikelförmiger Emissionen 333
9.2.3.2.1. Transmissionsmessung 334
9.2.3.2.2. Streulichtmessung 335
9.2.3.3. Messung gasförmiger Emissionen 335
9.2.3.3.1. Mehrkomponentenmessung mit Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie 336
9.2.3.3.2. Mehrkomponentenmessung mit nicht dispersiver Infrarotspektroskopie 337
9.2.3.3.3. Gesamtkohlenstoffmessung mit Flammenionisationsdetektoren 338
9.2.3.3.4. Quecksilbermessung 339
9.2.3.4. Messung von Bezugsgrößen 339
9.2.3.4.1. Volumenstrommessung 339
9.2.3.4.2. Sauerstoffmessung 341
9.2.3.4.3. Feuchtemessung 342
9.2.3.4.4. Temperaturmessung 342
9.2.3.4.5. Druckmessung 342
9.2.4. Auswertung der Emissionswerte 343
9.3. Emissionen aus der thermischen Abfallbehandlung in Deutschland 344
9.4. Quellenverzeichnis 347

10. Behandlung und Entsorgung von festen Rückständen aus der Abgasreinigung 351

10.1. Behandlungsverfahren 354
10.1.1. Verfestigungsverfahren 355
10.1.2. Waschverfahren 359
10.1.3. Sinterungsverfahren 361
10.1.3.1. Integrierte Sinterung 361
10.1.3.2. Externe Sinterung 362
10.1.4. Verglasungsverfahren 364
10.1.4.1. Oxidative Verfahren 365
10.1.4.2. Reduktive Verfahren 366
10.1.5. Rückgewinnungsverfahren 369
10.1.5.1. Rückgewinnung von Metallen 369
10.1.5.2. Rückgewinnung von Rohstoffen für die Sodaproduktion 369
10.1.5.3. Rückgewinnung von Phosphat 371
10.2. Entsorgung 372
10.2.1. Bergversatz 372
10.2.2. Untertagedeponierung 375
10.3. Quellenverzeichnis 376

11. Gesamtkonzepte zur Reinigung von Abgasen 379

11.1. Auswahlkriterien 381
11.1.1. Abscheideleistung 382
11.1.1.1. Nass-/Quasitrocken-/Trockenverfahren 382
11.1.1.2. Flugstromadsorber/Fest- oder Wanderbettadsorber 384
11.1.1.3. SNCR-/SCR-Verfahren 386
11.1.2. Rohgastemperatur 389
11.1.3. Standortfaktoren 389
11.1.4. Wirtschaftlichkeit 390
11.1.4.1. Nass-/Quasitrocken-/Trockenverfahren 391
11.1.4.2. SNCR-/SCR-Verfahren 396
11.2. Ausführungsbeispiele 399
11.3. Quellenverzeichnis 427

Abkürzungsverzeichnis **429**

Bildverzeichnis **437**

Tabellenverzeichnis **457**

Inserentenverzeichnis **465**

Stichwortverzeichnis **469**

Einführung

Bei der Verbrennung von fossilen und biogenen Brennstoffen entstehen aus der Oxidation der organischen Substanz hauptsächlich Kohlenstoffdioxid und Wasser. Neben diesen Hauptprodukten bilden sich aber auch – in Abhängigkeit des Brennstoffs und der Prozessbedingungen – Schadstoffe wie Kohlenstoffmonoxid, polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane, Stickstoffoxide, Schwefeloxide, Halogenwasserstoffe und Staub, die mit dem Abgasstrom aus der Feuerung ausgetragen werden.

Die Reinigung von Abgasen ist aus Umweltaspekten und aufgrund der strengen rechtlichen Begrenzungen für Emissionen aus Feuerungs- und Industrieanlagen in der Regel ein obligatorischer Verfahrensschritt. Insbesondere an thermische Abfallbehandlungsanlagen werden – aufgrund der Schadstoffbelastung des Inputs und der öffentlichen Aufmerksamkeit – hohe Anforderungen bezüglich der Emissionsminderung gestellt. Grundsätzlich wird zwischen Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Verminderung von Schadstoffemissionen unterschieden.

Unter Primärmaßnahmen fallen alle Maßnahmen, die verhindern, dass Schadstoffe in einer Verbrennungsanlage überhaupt erst entstehen. Hierzu zählen z.B. die vorgelagerte Ausschleusung von schadstoffhaltigen Materialien, eine ausreichende Homogenisierung des Brennstoffs, aber insbesondere auch eine auf Brennstoff und Feuerungssystem abgestimmte Steuerung des Verbrennungsprozesses. Durch eine optimierte Feuerungsleistungsregelung können z.B. eine nahezu vollständige Verbrennung erreicht und damit die Emissionen von Kohlenstoffmonoxid und gesamtorganischem Kohlenstoff sowie organischen Schadstoffen minimiert werden.

Die Entstehung der meisten Schadstoffe kann jedoch durch Primärmaßnahmen nicht verhindert werden, da die Schadstoffe bereits im Brennstoff vorhanden sind oder zwangsläufig durch chemische Prozesse während des Verbrennungsprozesses aus den Brennstoffinhaltsstoffen gebildet werden. Zur Abscheidung der während des Verbrennungsprozesses entstehenden Luftschadstoffe aus den Abgasen ist daher als Sekundärmaßnahme eine nachgeschaltete Abgasbehandlungsanlage erforderlich. Solche Abgasbehandlungsanlagen bestehen aus einem System von Apparaten und Reinigungsprozessen zur Minderung von partikel-, dampf- und gasförmigen Stoffen im Abgas. In einigen Apparaten werden nur einzelne Schadstoffe, in anderen mehrere Schadstoffgruppen abgeschieden.

Auch wenn die chemischen und physikalischen Wirkmechanismen sowie die Grundkonzepte zur Abscheidung von Schadstoffen für viele Brennstoffe Verwendung finden, können die geeignete und wirtschaftliche Auswahl und Zusammenstellung der technischen Apparate zur Minderung der Emissionen sowie die zu wählenden Prozessbedingungen je nach Brennstoff unterschiedlich ausfallen. Denn diese richten sich insbesondere nach der Schadstoffbelastung des Brennstoffs, der daraus resultierenden Zusammensetzung des Rohgases, den erwarteten Extremwerten und Konzentrationsschwankungen der Schadstoffe im Rohgas und nach den zu unterschreitenden maximalen Schadstoffkonzentrationen im Reingas entsprechend der einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte. Eine direkte Übertragbarkeit von Abgasreinigungsystemen aus dem Bereich fossil befeuerter Kraftwerke auf die thermische Abfallbehandlung ist daher nicht möglich.

Dieses Lehr- und Praxishandbuch hebt daher die Besonderheiten der Abgasreinigung nach der thermischen Abfallbehandlung hervor und erläutert die Unterschiede zu Abgasreinigungssystemen nach der thermischen Behandlung anderer Brennstoffe.

Der Inhalt umfasst die Herkunft und Wirkung von verbrennungscharakteristischen Luftschadstoffen, deren Entstehungsmechanismen im Verbrennungsprozess, Primär- und Sekundärmaßnahmen zu ihrer Reduzierung, Verfahren zur Emissionsmessung sowie Entsorgungsverfahren für Rückstände aus der Abgasreinigung. Insbesondere die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahrensschritte und die sinnvolle Kombination unter verschiedenen Randbedingungen werden herausgestellt.

Zudem enthält das Buch umfassende Analysen zur Emissionssituation, zu Betriebsmittelverbräuchen und Rückstandsmengen sowie zur Kostenstruktur von thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Abhängigkeit des eingesetzten Abgasreinigungssystems. Darüber hinaus werden Informationen zu aktuellen rechtlichen, wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungen und deren Einfluss auf die Abgasreinigung gegeben. Eine Auswertung des Status quo der Abgasreinigung nach der Abfallverbrennung in Deutschland, Ausführungsbeispiele zu den verschiedenen möglichen Aggregatekombinationen und typische Betriebswerte aus der Anlagenpraxis runden den Inhalt ab.

Damit ist das Werk zugleich ein Leitfaden zur Planung des für einen Standort und eine Abscheidungsaufgabe schlüssigen Gesamtkonzepts zur Abgasreinigung und richtet sich an Studierende, Entscheidungsträger, Planer und die betriebliche Praxis, beispielsweise wenn der Neubau eines Systems oder die Implementierung von Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden soll.

Abkürzungsverzeichnis

A	Alveolengängige Fraktion
AAS	Atomadsorptionsspektroskopie
ABl.	Amtsblatt (der Europäischen Union)
Abs.	Absatz
AES	Atomemissionsspektroskopie
AEZ	Abfallentsorgungszentrum
AFS	Atomfluoreszenzspektroskopie
AGW	Arbeitsplatzgrenzwert
AHKW	Abfallheizkraftwerk
AMS	Automated Measuring System (Automatische Messeinrichtung)
aq	aqueous (wässrig)
AST	Annual Surveillance Test (Jährlichen Funktionsprüfung)
AVA	Abfallverwertungsanlage
Az.	Aktenzeichen
B(a)P	Benzo(a)pyren
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BEPÜ	Bundeseinheitliche Praxis bei der Überwachung der Emissionen
BET	Brunauer, Emmett, Teller
BGBl.	(deutsches) Bundesgesetzblatt
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BLAI	Bund/Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BREF	Reference Documents on the Best Available Techniques
BTX	Benzol, Toluol, Xylol
BVT	Beste verfügbare Technik
CAH	Calciumaluminathydrat
CAS	Chemical Abstracts Service
CCMS	Committee on Challenges of Modern Society
CEN	Comité Europeén de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
CFD	Computational Fluid Dynamics

CLD	Chemiluminescence Detection
CMR	Carcinogenic, Mutagenic, Toxic for Reproduction
CSH	Calciumsilicathydrat
CVAAS	Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry
DepV	Deponieverordnung
d. h.	dass heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DK	Deponieklasse
DNA	Desoxyribonucleinsäure
DOAS	Differential Optical Absorption Spectroscopy
E	Einatembare Fraktion
EBS	Ersatzbrennstoff
ECAO	Environmental Criteria and Assessment Office
EDTA	Ethylene-Diamine-Tetra-Acetic Acid (Ethylendinitrilotetraessigsäure)
EINECS	European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances
EFÜ	Emissionsdatenfernübertragung
EMPA	Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EN	Europäische Norm
EPA	Environmental Protection Agency
ETS	Emission Trading System
EU	Europäische Union
f.	feucht
ff.	fortfolgende
FID	Flame Ionisation Detector (Flammenionisationsdetektor)
FTIR	Fourier-Transform-Infrared
FWL	Feuerungswärmeleistung
g	gaseous (gasförmig)
Gew.-	Gewichts-
GHS	Global harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien
GKF	Glasfaserverstärkter Kunststoff

GMBl.	Gemeinsames Ministerialblatt
HMW	Halbstundenmittelwert
HOK	Herdofenkoks
Hrsg.	Herausgeber
H-Sätze	Hazard Statements
IED	Industrial Emission Directive (Richtlinie über Industrieemissionen)
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
IVU	Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
KRdL	Kommission Reinhaltung der Luft
KrW	Kreislaufwirtschaftsgesetz
l	liquid (flüssig)
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MHKW	Müllheizkraftwerk
Mio.	Millionen
MSW	Municipal Solid Waste (fester Siedlungsabfall)
MVA	Müllverbrennungsanlage
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NDIR	Non Dispersive Infra-Red
NDUV	Non Dispersive Ultra-Violet
NP	National Policy
o. J.	ohne Jahr
org.	organisch
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PBT	Persistent, Bioaccumulative, Toxic
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD	Polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine
PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane
PM	Particulate Matter

ppb	parts per billion
ppm	parts per million
ppt	parts per trillion
P-Sätze	Precautionary Statements
PTFE	Polytetrafluorethylen
QAL	Qualitätssicherungsstufe
RABA	Restabfallbeseitigungsanlage
s	solid (fest)
s.	siehe
SAV	Sonderabfallverbrennungsanlage
SCR	Selective Catalytic Reduction (Selektive katalytische Reduktion)
SNCR	Selective Non Catalytic Reduction (Selektive nicht katalytische Reduktion)
sog.	sogenannte
RL	Richtlinie
RSC	Residual Sodium Chemicals
SRM	Standard Reference Method (Standardreferenzverfahren)
TA	Thermische Abfallbehandlungsanlage
TA	Technische Anleitung
TAV	Trocken-Additiv-Verfahren
TCDD	2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-Dioxin
TDLS	Tunable Diode Laser Spectroscopy (abstimmbare Diodenlaserspektroskopie)
TEF	Toxicity Equivalence Factor (Toxizitätsäquivalenzfaktor)
TEHG	Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz
TEQ	Toxic Equivalent (Toxizitätsäquivalent)
TFN	Total Fixed Nitrogen
TMT 15	Trimercapto-S-Triazin
TMW	Tagesmittelwert
TOC	Total Organic Carbon (Gesamtorganischer Kohlenstoff)
TOF	Turnover Frequency (Umsatzfrequenz)
TON	Turnover Number (Umsatzzahl)

tr.	trocken
TREA	Thermische Restabfallbehandlungs- und Energieverwertungsanlage
TRV	Thermische Restabfallverwertung
TS	Trockensubstanz
TS	Technical Specification
TSP	Total Suspended Particulates
UBA	Umweltbundesamt
UTD	Untertagedeponie
UTV	Untertageversatz
UV	Ultraviolett
VA	Verbrennungsanlage
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VersatzV	Versatzverordnung
vgl.	vergleiche
VLN	Very Low NO_x
Vol.	Volumen
vpm	parts per million per volume
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHO	World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation)
WI	Waste Incineration
WS	Wassersäule
w-Wert	Effektive Wandergeschwindigkeit
w/z-Wert	Wasser-Zement-Wert
ZWS	Zirkulierende Wirbelschicht

Bildverzeichnis

1. Herkunft und Wirkung von Luftschadstoffen

Bild 1 : Zusammenhang zwischen Emission, Transmission und Immission von Luftschadstoffen 5

Bild 2 : Gesamtstaubemissionen nach Quellgruppen in Deutschland von 1990 bis 2011 7

Bild 3 : Feinstaubemissionen (PM 10) nach Quellgruppen in Deutschland von 1995 bis 2011 8

Bild 4 : Feinstaubemissionen (PM 10) in Deutschland durch Zigarettenkonsum, Kaminnutzung, Feuerwerk und Grillen im Vergleich zur thermischen Abfallbehandlung 9

Bild 5 : Kohlenmonoxid-Emissionen nach Quellgruppen in Deutschland von 1990 bis 2011 10

Bild 6 : Allgemeine Strukturformeln von Dioxin und Furan 11

Bild 7 : Allgemeine Strukturformeln für polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) 11

Bild 8 : Allgemeine Strukturformel des Referenzdioxins 2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin (TCDD) 11

Bild 9 : Dioxinemissionen nach Quellgruppen in Deutschland von 1990 bis 2011 13

Bild 10 : Allgemeine Strukturformel der polychlorierten Biphenyle 13

Bild 11 : Allgemeine Strukturformeln von Benzo(a)pyren (links) und seiner mutagen wirkenden Epoxidform (7,8 Dihydroxy-9,10-epoxy-7,8,9,10-tetrahydrobenzo(a)pyren) (rechts) 14

Bild 12 : Emissionen an Benzo(a)pyren nach Quellgruppen in Deutschland von 1990 bis 2011 16

Bild 13 : NO_x-Emissionen nach Quellgruppen in Deutschland von 1990 bis 2011 17

Bild 14 : SO_2-Emissionen nach Quellgruppen in Deutschland von 1990 bis 2011 19

Bild 15 : Emissionen der Schwermetalle Kupfer, Zink, Blei und Nickel in Deutschland von 1990 bis 2011 23

Bild 16 : Emissionen der Schwermetalle Chrom, Arsen, Quecksilber und Cadmium in Deutschland von 1990 bis 2011 23

3. Schadstoffentstehung im Verbrennungsprozess und Primärmaßnahmen zur Reduzierung

Bild 17: Klassifizierung der Elemente bezüglich ihres Anreicherungsverhaltens bei der Verbrennung 60

Bild 18: Primäre Staubbildung in Abhängigkeit des Primärluftvolumens in verschiedenen Abfallverbrennungsanlagen 61

Bild 19: Größensummenverteilung von Stäuben aus dem Elektrofilter einer Abfallverbrennungsanlage 61

Bild 20: CO-Freisetzung bei der Verbrennung in Abhängigkeit vom O_2-Überschuss 62

Bild 21: Gleichgewicht der Boudouard-Reaktion bei Atmosphärendruck 63

Bild 22: PCDD-Bildung aus gasförmigem Trichlorphenol (10 % O_2 in N_2, 300 °C, 30 min Reaktionszeit) 64

Bild 23: Temperaturabhängigkeit der PCDD-Bildung auf Flugasche (Luft, 0 bis 2,5 Vol.-% H_2O, Reaktionszeit 2 h) 65

Bild 24: PCDD/F-Bildungsgeschwindigkeiten als Funktion der Kupferkonzentration der Flugasche (MVA Göppingen, 1 entspricht $1{,}73 \cdot 10^{-5}$ mol Cu /g) 65

Bild 25: Bildung von polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration im Rohgas 66

Bild 26: Reaktionsschema zur Bildung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bei Verbrennungsprozessen 66

Bild 27: Bildung von höherkondensierten PAK aus kleineren Vorläufer-PAK 67

Bild 28: Bildungsmechanismen für Stickstoffmonoxid bei Verbrennungsprozessen 68

Bild 29: Verlauf der NO_x-Bildung in Abhängigkeit von der maximalen Gastemperatur im Feuerraum für unterschiedliche Bildungsmechanismen am Beispiel einer Kohlenstaubfeuerung 68

Bild 30: Einfluss des Luftüberschusses auf die Entstehung von Stickstoffoxiden bei verschiedenen Verbrennungstemperaturen 69

Bild 31: Einfluss des Stickstoffgehalts im Brennstoff auf die Stickstoffoxidemissionen 70

Bild 32: Bildungswege von Brennstoff-NO_x 70

Bild 33: N_2O-Bildung als Funktion der Temperatur nach der Abgasausbrandzone 72

Bild 34: NO_x- und N_2O-Emissionen in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer Wirbelschichtfeuerung mit niederflüchtigen, bituminösen Kohlen (Dicke der Balken entspricht der Streuung der Messdaten) 72

Bild 35: Bildung stickstoffhaltiger Verbindungen in Flammen verschiedener Stöchiometrie (TFN: Total Fixed Nitrogen) 75

Bild 36: Prinzip der Abgasrezirkulation 76

Bild 37: NO_x-Rohgaskonzentration in Abhängigkeit des Inertgasanteils der Sekundärluft 76

Bild 38: Low-NO_x-Brenner mit dreifacher Luftstufung 77

Bild 39: Dampfdruckkurven einiger Metalle und Metallverbindungen 80

Bild 40: Korrelation der Freisetzung der Metalle Kupfer, Zink und Blei in Abhängigkeit der mittleren Brennstoffbetttemperatur 81

Bild 41: Vergleich von Transferkoeffizienten (mit Standardabweichung) für Schwermetalle in die Schlacke bei der Hausmüllverbrennung auf dem Rost 83

4. Chemische und physikalische Grundlagen der Schadstoffminderung

Bild 42: Grundprinzip der Fliehkraft (F_z) 94

Bild 43: Grundprinzip der Stoßionisation 95

Bild 44: Grundprinzip der Oberflächen- und der Tiefenfiltration bei Abscheidung von Partikeln aus einem Gas 96

Bild 45: Abscheidemechanismen bei der Tiefenfiltration in einem Faserschichtfilter 97

Bild 46: Staubabscheidung an einem Flüssigkeitstropfen 98

Bild 47: Teilschritte der Adsorption und Desorption 100

Bild 48: Porenstruktur von Herdofenkoks im Vergleich zur Molekülgröße des adsorbierten Stoffs 101

Bild 49: Auswahl verschiedener Modellansätze für Adsorptionsisothermen (X = Beladung der Adsorbensoberfläche, c = Konzentration des Adsorptivs im Gas/in der Flüssigkeit) 102

Bild 50: Unterschiede zwischen physikalischer und chemischer Absorption 104

Bild 51: Schematische Darstellung des Konzentrationsverlaufs bei der Absorption eines Gases in eine Flüssigkeit 104

Bild 52: Modellansätze für Lösungsgleichgewichte bei der Absorption für ideale Lösungen nach dem Raoultschen Gesetz (links) sowie für nicht ideale Lösungen bei anziehender Wechselwirkung der Teilchen (Mitte) und abstoßender Wechselwirkung der Teilchen (rechts) 106

Bild 53: Vereinfachte Darstellung zur Herabsetzung der Aktivierungsenergie durch die Verwendung eines Katalysators 107

Bild 54: Prinzip der heterogenen Katalyse nach dem Eley-Rideal-Mechanismus 108

Bild 55: Prinzip der heterogenen Katalyse nach dem Langmuir-Hinshelwood-Mechanismus 108

5. Sekundärmaßnahmen zur Minderung partikelförmiger Schadstoffe

Bild 56: Fraktionsabscheidegrade verschiedener Staubabscheider in Abhängigkeit der Partikelgröße 113

Bild 57: Prinzip der Staubabscheidung mit einem Schwerkraftabscheider 115

Bild 58: Abscheideprofile von Trägheitsabscheidern 115

Bild 59: Beispielhafte Ausführungsform eines Zyklons 117

Bild 60: Prinzip der Staubabscheidung in einem Aerozyklon mit tangentialer Rohgaszuführung 117

Bild 61: Bauformen verschiedener Zyklone mit tangentialer und axialer Gaszuführung 118

Bild 62: Abhängigkeit von Staubabscheidegrad und Zyklondurchmesser 119

Bild 63: Abscheidegrad und Druckverlust in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit in einem Zyklon (1 mm WS (Wassersäule) = 9,80665 Pa) 119

Bild 64: Grundprinzip eines Multizyklons 120

Bild 65: Prinzipieller Aufbau eines Trockenelektrofilters 121

Bild 66: Prinzip der Partikelabscheidung im Platten-Trockenelektrofilter 122

Bild 67: Ionisationsvorgang am Elektrofilter 122

Bild 68: Fraktionsabscheidekurve eines Trockenelektrofilters 123

Bild 69: Prinzipieller Aufbau von Röhren- und Plattenelektrofilter im Vergleich 124

Bild 70: Beispielhafte Ausführung eines zweifeldrigen Trockenelektrofilters 125

Bild 71: Abhängigkeit des Abscheidegrads von der Wandergeschwindigkeit und der spezifischen Niederschlagsfläche 126

Bild 72: Einfluss der Wandergeschwindigkeit auf die erforderliche Niederschlagsfläche 127

Bild 73: Abhängigkeit der Wandergeschwindigkeit vom spezifischen elektrischen Staubwiderstand 127

Bild 74: Abhängigkeit des spezifischen Staubwiderstands von Abgastemperatur und Schwefelsäuretaupunkt 127

Bild 75: Abhängigkeit der Wandergeschwindigkeit vom spezifischen Staubwiderstand 128

Bild 76: Funktionsprinzip eines einfeldrigen Vertikal-Nasselektrofilters 129

Bild 77: Funktionsprinzip eines zweifeldrigen Horizontal-Nasselektrofilters 130

Bild 78: Blick in eine Nasselektrofilteranlage: a) Eingebaute Rohrbündel in einer Nasselektrofilteranlage, b) Edelstahlelektrode mit Entladungsdornen und leitfähige Polypropylenrohre, c) Tragrahmen für die Entladungselektroden, d) Spülung der Niederschlagselektroden mit Wasser 131

Bild 79: Beispielhafte Ausführung für einen Vertikal-Nasselektrofilter mit zwei Abscheidezonen 132

Bild 80: Beispielhafte Ausführung eines vertikalen Kondensations-Nasselektrofilters mit integriertem Wäscher 133

Bild 81: Aerosolabscheidung im Nasselektrofilter in Abhängigkeit des angelegten Filterstroms 133

Bild 82: Unterteilung von filternden Abscheidern 135

Bild 83: Prinzipieller Aufbau eines Gewebefilters mit mehreren Kammern 136

Bild 84: Beispielhafte Ausführungsform eines Mehrkammergewebefilters mit vertikal angeordneten Filterschläuchen 137

Bild 85: Beispielhafte Ausführungsform eines Rundgewebefilters (links) und eines Reihengewebefilters (rechts) 138

Bild 86: Prinzip von Horizontal- und Vertikalgewebefilter 138

Bild 87: Aufbau eines Filterelements 139

Bild 88: Einsetzen von Filterelementen in die Kopfplatte eines Gewebefilters....139

Bild 89: Beispielhafte Ausführung eines Flachschlauchfilterelements (Lühr Filter GmbH & Co. KG)....140

Bild 90: Mikroskopische Vergrößerung eines Schnitts durch ein Nadelfilz mit Stützgewebe (links) und eine Membran auf Nadelfilz-Trägermaterial (rechts)....141

Bild 91: Aufbau eines ein- und eines zweiteiligen Stützkorbes....142

Bild 92: Schutzwirkung des Precoatings....143

Bild 93: Filtrations- und Abreinigungsphase eines druckluftabgereinigten, außen-beaufschlagten Filterschlauchs....144

Bild 94: Schematische Darstellung des typischen zeitlichen Verlaufs von Druckverlust und Partikelkonzentration im Reingas bei Gewebefiltern mit Pulse-Jet-Abreinigung....145

Bild 95: Abhängigkeit des Reingasstaubgehalts von der Filterflächenbelastung....145

Bild 96: Abhängigkeit des Druckverlusts von der spezifischen Filterflächenbelastung....146

Bild 97: Beispielhafte Ausführung einer Venturidüse....147

6. Sekundärmaßnahmen zur Minderung von Stickstoffoxiden

Bild 98: NO_x-Konzentrationen im Rohgas von Abfallverbrennungsanlagen (Messung an Von-Roll-Anlagen)....153

Bild 99: Lagertank für Ammoniakwasser mit Sicherheitseinrichtungen....154

Bild 100: Prinzip der selektiven nichtkatalytischen Reduktion von Stickstoffoxiden mit Druckluft-Eindüsung....157

Bild 101: Prinzip der selektiven nichtkatalytischen Reduktion von Stickstoffoxiden mit Zerstäuberwasser....158

Bild 102: Umsetzung der Stickstoffoxide und des Reduktionsmittels in Abhängigkeit von der Temperatur....159

Bild 103: Reaktionsschema zur Reduktion von NO_x durch Zugabe von Ammoniakwasser oder Harnstofflösung....160

Bild 104: NO_x-Konvertierung nach dem SNCR-Verfahren in Abhängigkeit vom Stöchiometriefaktor bei unterschiedlichen Temperaturen....160

Bild 105: NO_x-Konvertierung nach dem SNCR-Verfahren in Abhängigkeit von der Temperatur bei unterschiedlichen Stöchiometriefaktoren 161

Bild 106: Eindüsen von Ammoniakwasser mit konventioneller Technik in drei Ebenen (links) und Eindüsen von Ammoniakwasser mit Winkeldüsen in einer Ebene (rechts) 162

Bild 107: Tangentiale Eindüstechnik mit Zweistoff-Winkeldüsen und deren Freiheitsgrade 162

Bild 108: Beispielhafte Ausführung einer Zweistoffdüse mit Innenmischung 164

Bild 109: Beispielhafte Ausführung einer Zweistoffdüse mit Außenmischung 164

Bild 110: Funktionsprinzip einer Zweistoffdüse mit Innenmischung 165

Bild 111: Beispielhafte Darstellung einer Zweistoffdüse mit Innenmischung und Mehrfachbohrungen und deren Sprühbild 165

Bild 112: Typische Sprühformen in der Zerstäubungstechnik 166

Bild 113: Vermischung des Abgases im Freistrahl 167

Bild 114: Eindüsverhalten von Harnstofflösung im Vergleich zu Ammoniakwasser 168

Bild 115: Lachgasbildung bei einer Labor-SNCR mit Harnstoff (α = 1,2, 10 % H_2O, 4 % O_2) 169

Bild 116: NO_x-Umsatz in Abhängigkeit der Temperatur bei Ammoniakwasser- und Harnstoff-SNCR im Vergleich (10 % H_2O, 4 % O_2) 170

Bild 117: NO_x-Abscheidung in Abhängigkeit der Temperatur 171

Bild 118: Prinzipieller Aufbau einer akustischen Gastemperaturmessung (agam) 172

Bild 119: Beispiel für die Anordnung und Aufteilung der Messstellen eines akustischen Gastemperaturmesssystems in einer Abfallverbrennungsanlage 173

Bild 120: Temperaturabhängige Umschaltung einzelner Injektionslanzen beim SNCR-Verfahren 173

Bild 121: Schematischer Aufbau eines Strahlungspyrometers 174

Bild 122: Messung der Temperatur eines heißen Gaskörpers durch eine kalte Gasschicht hindurch 174

Bild 123: SNCR-Verfahren mit Infrarot-Strahlungs-Pyrometer 175

Bild 124: Schematische Darstellung eines konventionellen SCR-Katalysators 176

Bild 125: Prinzip der selektiven katalytischen Umsetzung von Stickstoffoxiden mit Ammoniak und Sauerstoff 177

Bild 126: Schematische Darstellung der Anlagenschaltungen einer High-Dust-Rohgas-SCR, einer Low-Dust-Rohgas-SCR und einer Reingas-SCR (Tail-End-SCR) 178

Bild 127: Verfahrensfließbild einer Reingas-SCR-Anlage (Tail-End) nach einer quasitrockenen Abgasreinigung 180

Bild 128: Beispielhafte Ausführung eines Eindüsgitters für die Einbringung von Ammoniakwasser in den Abgaskanal 180

Bild 129: Blick in den Abgaskanal auf die Eindüslanzen einer Rohgas-SCR (links) sowie auf einen statischen Mischer zur Verteilung des Reduktionsmittels (rechts) 181

Bild 130: Kristallstruktur des Anatas- (links) und des Rutil-Titandioxids (rechts) 182

Bild 131: Arbeitsbereiche verschiedener SCR-Katalysatoren 183

Bild 132: Schematische Darstellung der Reaktionen an den aktiven Zentren eines SCR-Katalysators 184

Bild 133: Modularer Aufbau von Katalysatoren 185

Bild 134: NO_x-Abbau sowie Entstickungsgrad in Abhängigkeit von der Anzahl der Katalysatorebenen und der NO_x-Rohgaskonzentration 185

Bild 135: Element, Modul und Struktur eines Wabenkatalysators 186

Bild 136: Element, Modul und Struktur eines Plattenkatalysators 186

Bild 137: Temperaturabhängigkeit des NO_x-Reduktionsgrads bei einem V_2O_5-basierten Katalysator 188

Bild 138: Relative NO_x-Reduktionsaktivität und SO_2-Konversionsrate in Abhängigkeit des V_2O_5-Gehaltes eines SCR-Katalysators 189

Bild 139: Geometrische Kenngrößen eines Wabenkatalysators 189

Bild 140: Druckverlust eines Katalysators in Abhängigkeit des Pitchs und der Strömungsgeschwindigkeit des Abgases 190

Bild 141: Einfluss des Katalysatorvolumens auf den NO_x-Abscheidegrad und den NH_3-Schlupf 190

Bild 142: Verlauf der Katalysatoraktivität über die Betriebsdauer und Einfluss auf den NH_3-Schlupf 191

Bild 143: Anströmfläche eines Wabenkatalysators ohne (links) und mit Ablagerungen (rechts) 192

Bild 144: Typische Aktivitätskurve eines vanadiumhaltigen SCR-Katalysators auf Basis von Titanoxid 193

Bild 145: Parallel- und Folgereaktionen bei katalytischen Umsetzungen 194

Bild 146: Temperatur- und konzentrationsabhängige Bildung von Ammoniumsulfat und -hydrogensulfat aus Schwefeltrioxid und Ammoniak bei Normaldruck 196

Bild 147: Bildung von Ammoniumchlorid in Abhängigkeit der Temperatur 197

Bild 148: Ablagerung von Ammoniumsalzen in Abhängigkeit der Betriebstemperatur des SCR-Katalysators und der SO_x-Konzentration 197

Bild 149: Abhängigkeit der Hg^0-Oxidation und der SO_2-Konversion an einem SCR-Katalysator 198

Bild 150: Abhängigkeit der Hg^0-Oxidation von der Temperatur an einem SCR-Katalysator 198

Bild 151: Prinzip eines Kombireaktors zur gemeinsamen Abscheidung von Stickstoffoxiden und polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen 199

Bild 152: Beispiel für eine Anlagenschaltung für ein Kombinationsverfahren aus SNCR und SCR 200

7. Sekundärmaßnahmen zur Minderung organischer Schadstoffe sowie dampfförmiger Schwermetalle

Bild 153: Porenradienverteilung von Aktivkohle und Herdofenkoks im Vergleich 211

Bild 154: Herdofenkoks-Staub (links) sowie seine mikroskopische Vergrößerung (rechts) 211

Bild 155: Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf den maximalen Explosionsdruck von Gemischen aus kohlenstoffhaltigen Adsorptionsmitteln und Luft (T = 20 °C) 213

Bild 156: Volumenabhängigkeit der Selbstentzündungstemperatur kohlenstoffhaltiger Adsorbentien 214

Bild 157: Temperaturabhängigkeit der CO- und CO_2-Entwicklung bei Braunkohlenaktivkoks 214

Bild 158: Struktur von Zeolithen als Modell 215

Bild 159: Struktur eines Dreischichtsilicats....216

Bild 160: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Suevit (links) und Bims (rechts)....217

Bild 161: Grundkonzepte von Wanderbettadsorbern nach den Strömungsprinzipien Kreuz- und Gegenstrom....219

Bild 162: Beispielhafte Ausführung eines Wanderbettadsorbers im Kreuzstrom mit vier jeweils dreischichtigen Aktivkoksbetten....220

Bild 163: Beispielhafte Ausführung eines Wanderbettadsorbers im Gegenstrom mit vier Sektionen....221

Bild 164: Typisches Beladungsprofil eines Wanderbettadsorbers auf Basis von Braunkohlenaktivkoks für verschiedene Schadstoffe....222

Bild 165: Schwermetallbeladung eines Koksbettes in Abhängigkeit der Betttiefe....223

Bild 166: Abhängigkeit der Temperaturerhöhung in Koksreaktoren von der Anströmgeschwindigkeit (Betttiefe: 1 m)....224

Bild 167: Desorption durch Temperaturwechsel (B1 >> B2) oder durch Druckwechsel (B1 >> B0)....225

Bild 168: Prinzip des Flugstrom-Filterschichtverfahrens....226

Bild 169: Lager-, Transport- und Injektionssystem für Herdofenkoks (links) sowie Einblaslanzen im Abgaskanal (rechts oben) und Einblasplattform auf dem Abgaskanal (rechts unten)....226

Bild 170: Einfluss des Inertanteils auf die Explosionsfähigkeit von Herdofenkoks (p_{max} (n = 0): maximaler Explosionsdruck des reinen Herdofenkokses)....227

Bild 171: Temperaturabhängigkeit der Quecksilberabscheidung an Aktivkoks....227

8. Sekundärmaßnahmen zur Minderung saurer Schadgase

Bild 172: Einteilung der Verfahren zur Minderung saurer Schadgase nach der thermischen Abfallbehandlung....233

Bild 173: Grundkonzepte zur Minderung saurer Schadstoffe....234

Bild 174: Oberflächenstruktur von Natriumhydrogencarbonat vor (links) und nach (rechts) der thermischen Aktivierung....237

Bild 175: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberflächenstruktur von Standard-Kalkhydrat (links) im Vergleich zu hochaktivem Kalkhydrat (rechts)....245

Bild 176: Verfahrensprinzip für ein nasses Abgasreinigungsverfahren nach Rostfeuerung mit saurem Wäscher und Kalkmilchwäscher sowie Sprühtrocknung....248

Bild 177: Verfahrensprinzip für ein nasses Abgasreinigungsverfahren nach Wirbelschichtfeuerung mit Quench und Natronlaugewäscher....248

Bild 178: Strömungsprinzipien von Wäscherbauarten....249

Bild 179: Beispielhafte Darstellung der Strömungs- und Funktionsprinzipien verschiedener Wäschertypen....250

Bild 180: Beispielhafte Ausführung eines Sprühturmwäschers im Gegenstrom....251

Bild 181: Beispielhafte Ausführung der Sprühebenen eines Sprühturmwäschers....251

Bild 182: Beispielhafte Ausführung eines Füllkörperwäschers im Gleichstrom....252

Bild 183: Beispiele für typische Füllkörperformen....252

Bild 184: Funktionsprinzipien von Tropfenabscheidern....254

Bild 185: SO_2-Dissoziation in Wasser in Abhängigkeit des pH-Werts....256

Bild 186: Schematische Darstellung einer Kalksteinwäsche für Großkraftwerke....258

Bild 187: Prinzip eines zweistufigen Kalksteinwäschers nach dem Dual-Loop-Verfahren der Fisia Babcock Environment....260

Bild 188: Beispielhafte Ausführung eines Kalkmilchwäschers....261

Bild 189: Natronlauge-Füllkörperwäscher im Gegenstrom mit Ring-Jet-Stufe (Multiventuristufe zur Aerosolabscheidung) und vorgeschalteter Quench....262

Bild 190: Beispielhafte Darstellung für die Reinigung von Abwasser aus der nassen Abgasreinigung....268

Bild 191: Kammerfilterpresse (links) und abgeschiedener Filterkuchen (rechts)....270

Bild 192: Verfahrensschema der HCl-Rektifikationsanlage der Abfallverwertungsanlage Rugenberger Damm (MVR) in Hamburg....272

Bild 193: Beispielhafte Aufbereitung von Gipssuspension aus dem SO_2-Wäscher....273

Bild 194: SO_2-Abscheidung in Abhängigkeit der Temperatur und der relativen Abgasfeuchte....275

Bild 195: Einfluss der HCl-Konzentration und der absoluten Feuchte auf den SO_2-Gesamtabscheidegrad (T = 70 °C) 276

Bild 196: Abhängigkeit des SO_2-Abscheidegrades vom HCl/SO_2-Verhältnis (T = 150 bis 170 °C, Stöchiometriefaktor: 1,2, Umlauf: 10 bis 50 g/m³, HCl-Abscheidegrad ≥ 99 %) 277

Bild 197: Verfahrensprinzip eines Sprühabsorptionsverfahrens 280

Bild 198: Vorgänge am Sprühtropfen beim der Sprühabsorption 283

Bild 199: Beispiel eines Sprühabsorbers mit Rotationszerstäuber 285

Bild 200: Beispiele für Zerstäuberrad (links) und Zerstäuberrad-Einsatz-Düse (rechts) 285

Bild 201: Druckluftbetriebene Zweistoffdüse für den Eintrag von Kalkmilch in einen Sprühabsorber 286

Bild 202: Düsenlanzen in einem Sprühabsorber 286

Bild 203: Verfahrensprinzip für ein konditioniert-trockenes Verfahren mit gesondertem Verdampfungskühler zur Abgaskonditionierung 287

Bild 204: Prinzip eines Verdampfungskühlers 289

Bild 205: Prinzip eines Befeuchtungsmischers 289

Bild 206: Innenansicht eines Befeuchtungsmischers für Rezirkulat nach mehrmonatigem Betrieb ohne Reinigung 290

Bild 207: Befeuchtungsmischer mit integriertem Trockenlöscher 290

Bild 208: Prinzip eines Flugstromreaktors 291

Bild 209: NID-Reaktor der Alstom Power Service GmbH 291

Bild 210: Rotosorp-Kettenreaktor der Nederman Filtration GmbH 292

Bild 211: LAB-Loop-Umlenkflugstromreaktor der LAB GmbH 292

Bild 212: Kugelrotor-Umlaufverfahren der Lühr Filter GmbH & Co. KG 292

Bild 213: Kugelrotor-Umlaufreaktor der Lühr Filter GmbH & Co. KG 293

Bild 214: Prinzip eines zirkulierenden Wirbelschichtreaktors 293

Bild 215: HZI Semi-Dry-Verfahren der Hitachi Zosen Inova AG 294

Bild 216: Verfahrensprinzip für das Trockenverfahren mit Kalkhydrat 297

Bild 217: Verfahrensprinzip für das Trockenverfahren mit Natriumhydrogencarbonat 298

Bild 218: Veränderung der Oberflächenstruktur von Natriumhydrogencarbonat beim Mahlvorgang und bei der thermischen Aktivierung 299

Bild 219: HCl-Abscheidegrad mit Natriumhydrogencarbonat in Abhängigkeit des Stöchiometriefaktors 300

Bild 220: SO_2-Abscheidegrad mit Natriumhydrogencarbonat in Abhängigkeit des Stöchiometriefaktors 300

Bild 221: Beispielhafte Ausführung eines Flugstromreaktors für die trockene Abgasreinigung 302

Bild 222: Veranschaulichung von Kalzinierungs- und Sulfatisierungsreaktion bei der Direktentschwefelung 303

Bild 223: Abhängigkeit des SO_2-Abscheidegrades bei der Direktentschwefelung von der Temperatur für die Sorptionsmittel Kalkhydrat ($Ca(OH)_2$) und Branntkalk (CaO) (Molverhältnis Ca/S = 1) 304

Bild 224: p/T-Diagramm zur Einbindung von HCl, HF und SO_2 mit CaO (20 % H_2O-Gehalt im Abgas bei HCl und HF, 6 % O_2-Gehalt im Abgas bei SO_2) 305

Bild 225: Abhängigkeit des Entschwefelungsgrades bei der Direktentschwefelung vom Ca/S-Verhältnis (Sorptionsmittel: $Ca(OH)_2$, 100 % Kessellast, Schwefelgehalt im Brennstoff: 1,01 %) 305

Bild 226: Beispiel eines Kombinationsverfahrens aus Sprühabsorption und konditionierter Trockensorption zur Abscheidung saurer Schadgase 307

Bild 227: Beispiel eines Kombinationsverfahrens aus Sprühabsorption und Nassverfahren zur Abscheidung saurer Schadgase 307

Bild 228: CFD-Simulation der Abgastemperaturverteilung in einem konditioniert-trockenen Abgasreinigungssystem 308

Bild 229: CFD-Simulation der Abgasgeschwindigkeiten in einem konditioniert-trockenen Abgasreinigungssystem 308

9. Emissionen und Emissionsüberwachung

Bild 230: Illustration der relevanten Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit Messstrecke und Messplatz nach DIN EN 15259 317

Bild 231: Typischer Aufbau einer Messbühne zur Emissionsmessung am Kamin 318

Bild 232: Beispiel eines in-stack Probenahmesystems für Staub mit Planfilterkopfgerät und nachgeschaltetem Absorptionssystem für filtergängige Staubinhaltsstoffe 321

Bild 233: Probenahmeverfahren für polychlorierte Dibenzodioxine und -furane 322

Bild 234: Probenahme gasförmiger anorganischer Verbindungen durch Absorption 323

Bild 235: Übersicht über die Qualitätsanforderungen der DIN EN 14181 an automatische Messeinrichtungen zur kontinuierlichen Emissionsmessung 326

Bild 236: Beispiel für eine Kalibrierfunktion und ihren Gültigkeitsbereich 328

Bild 237: Aufbauvarianten für Emissionsmesseinrichtungen 332

Bild 238: Beispiel für eine in-situ-Messung 333

Bild 239: Beispiele für eine kalte (links) und heiße (rechts) extraktive Messeinrichtung 333

Bild 240: Prinzip der Transmissionsmessung 334

Bild 241: Prinzip der rückwärtsgerichteten Streulichtmessung 335

Bild 242: Messprinzip eines FTIR-Mehrkomponentenspektrometers mit Michelson-Interferometer-Anordnung 336

Bild 243: Messprinzip eines NDIR-Mehrkomponentenspektrometers mit beheizter Messgaszelle 337

Bild 244: Schematische Darstellung eines Flammenionisationsdetektors 338

Bild 245: Gängige Verfahren zur Quecksilbermessung 339

Bild 246: Messprinzip einer Staudrucksonde (hier: Prandtl-Rohr) 340

Bild 247: Prinzip der Ultraschall-Durchflussmessung 340

Bild 248: Prinzipaufbau eines Messgerätes zur paramagnetischen Sauerstoffmessung 341

Bild 249: Messprinzip einer Zirkoniumdioxidsonde 342

Bild 250: Bildung der zu klassierenden Mittelwerte nach der Bundeseinheitlichen Praxis bei der Überwachung der Emissionen 343

Bild 251: Beispielhafte Trendkurven für Emissionswerte einer thermischen Abfallbehandlungsanlage aus der Anzeige im Leitsystem 344

Bild 252: Emissionskonzentrationen deutscher Abfallverbrennungsanlagen (Jahresmittelwerte 2007, n = 50) im Vergleich zu den Grenzwerten der 17. BImSchV (Fehlerindikator: Standardabweichung) 346

Bild 253: Staubreingaswerte der Kehrichtverwertungsanlage Zürcher Oberland (KEZO) im Vergleich zur Belastung ländlicher und urbaner Umgebungsluft 346

Bild 254: Jahresemissionsfrachten deutscher Abfallverbrennungsanlagen für Haushaltsabfälle und Ersatzbrennstoffkraftwerke (Auswertungsjahr: 2013).....347

10. Behandlung und Entsorgung von festen Rückständen aus der Abgasreinigung

Bild 255: Rückstandsentstehung bei verschiedenen Abgasreinigungssystemen.....353

Bild 256: Druckfestigkeiten von Mörteln mit Quarzmehl und Flugasche aus der Kohlenstaubfeuerung in Abhängigkeit des Wasser-Zement-Wertes (w/z-Wert).....356

Bild 257: Vereinfachtes Verfahrensfließbild für einen Verfestigungsprozess für Rückstände aus der Abgasreinigung 357

Bild 258: Mischung von Wasser und Flugasche in einem stationären Mixer 357

Bild 259: Beispiel für die Verfüllung einer Deponie mit einer Flugasche-Zementmischung in Lagen 358

Bild 260: Ausgehärtetes Produkt aus der Verfestigung
a) ohne Wasserstoffentstehung
b) geborsten aufgrund der Entstehung von Wasserstoff 358

Bild 261: Nasschemisches Verfahren zur Metallrückgewinnung aus Flugstaub (Von Roll Inova AG).....359

Bild 262: Integrierte Sinterung von Flugstäuben nach dem Syncom Plus Verfahren der Martin GmbH.....362

Bild 263: Externe Sinterung von Flugstäuben nach dem Ash-Dec-Verfahren 363

Bild 264: Pelletierte Flugasche aus dem Ash-Dec-Verfahren 363

Bild 265: Plasmaschmelzverfahren für Flugstäube der Le Gaz Integral.....365

Bild 266: EloMelt-Verfahren der L.& C. Steinmüller GmbH 366

Bild 267: Resolest-Verfahren zur Aufbereitung natriumhaltiger Reststoffe 370

Bild 268: Stapelversatz von Big Bags 373

Bild 269: Dickstoffversatz beim Einbringen (links) und nach der Aushärtung (rechts) 374

Bild 270: Ablagerung von Big Bags mit gefährlichen Abfällen in der Untertagedeponie Heilbronn 375

11. Gesamtkonzepte zur Reinigung von Abgasen

Bild 271: Kombinationsmöglichkeiten für ein Gesamtkonzept einer Abgasreinigung 381

Bild 272: Jahresemissionswerte deutscher Abfallverbrennungsanlagen mit nassen und quasi-trockenen oder trockenen ($NaHCO_3$) Abgasreinigungssystemen im Vergleich (n = 50, Fehlerindikator: Standardabweichung, Auswertungsjahr: 2007) 383

Bild 273: Spannbreite der Emissionen von Chlorwasserstoff aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen (Jahresmittelwerte) in Abhängigkeit des Abgasreinigungsverfahrens (n = 50) 383

Bild 274: Spannbreite der Emissionen von Schwefeldioxid aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen (Jahresmittelwerte) in Abhängigkeit des Abgasreinigungsverfahrens (n = 50) 384

Bild 275: Spannbreite der Emissionen von Quecksilber aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen (Jahresmittelwerte) in Abhängigkeit des Abgasreinigungsverfahrens (n = 50) 385

Bild 276: Spannbreite der Emissionen von PCCD/F aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen (Einzelmesswerte) in Abhängigkeit des Abgasreinigungsverfahrens (n = 50) 385

Bild 277: Spannbreite der Emissionen von Stickstoffoxiden aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen (Jahresmittelwerte) in Abhängigkeit des Entstickungsverfahrens (n = 50) 386

Bild 278: Investitionskosten für verschiedene Abgasreinigungssysteme im Vergleich (Auswertungsjahre 2003 bis 2010) 391

Bild 279: Durchschnittliche spezifische Verbräuche an Sorptionsmitteln und Rückstandsmengen in exemplarischen Abfallverbrennungsanlagen (n = 16) 393

Bild 280: Spezifische jährliche Kosten von Abgasreinigungsvarianten im Vergleich (Beispiel für eine Abfallverbrennungsanlage mit 200.000 t/a) 394

Bild 281: Gesamtkostenentwicklung von reinen Quasitrockenverfahren im Vergleich zu Quasitrockenverfahren in Kombination mit Nassverfahren in Abhängigkeit der Chlor-/Schwefelfracht (Cl/S-Fracht) 395

Bild 282: Durchschnittliche spezifische Verbräuche an Adsorptionsmittel für Aktivkoksfilter und Flugstromadsorber in exemplarischen Abfallverbrennungsanlagen (n = 16) 396

Bild 283: Durchschnittliche spezifische Verbräuche an Ammoniakwasser (NH_4OH) für SCR- und SNCR-Verfahren in exemplarischen Abfallverbrennungsanlagen (Rostfeuerung, n = 16) 397

Bild 284: Jahreskosten für verschiedene Entstickungstechnologien im Vergleich (Beispiel für eine Abfallverbrennungsanlage mit einer Kapazität von 200.000 t/a und einem Abgasvolumen von 140.000 Nm^3/h f., Abschreibungsdauer: 15 a, Zinssatz: 6 %, Instandhaltung: 3 % der Investitionskosten) 398

Bild 285: Spezifische Jahreskosten für verschiedene Entstickungstechnologien im Vergleich (Beispiel für eine Abfallverbrennungsanlage mit einer Kapazität von 200.000 t/a und einem Abgasvolumen von 140.000 Nm^3/h f., Abschreibungsdauer: 15 a, Zinssatz: 6 %, Instandhaltung: 3 % der Investitionskosten) 398

Bild 286: Thermische Abfallbehandlungsanlagen für Haushaltsabfälle in Deutschland 399

Bild 287: Ersatzbrennstoffkraftwerke in Deutschland 404

Bild 288: Nasses Abgasreinigungsverfahren mit Kalksteinwäsche und Sprühtrocknung der Abfallverbrennungsanlage München-Nord 407

Bild 289: Nasses Abgasreinigungsverfahren mit Natronlaugewäscher und Sprühtrockner der Abfallverbrennungsanlage Bonn 408

Bild 290: Nasses Abgasreinigungsverfahren mit Abwasserreinigung der Abfallverbrennungsanlage Pfaffenau (Wien, Österreich) 409

Bild 291: Nasses Abgasreinigungsverfahren der Sonderabfallverbrennungsanlage Leverkusen-Bürrig 410

Bild 292: Nasses Abgasreinigungsverfahren der Sonderabfallverbrennungsanlage Herten 411

Bild 293: Quasitrockenes Abgasreinigungsverfahren der Sonderabfallverbrennungsanlage Schöneiche 412

Bild 294: Nasses Abgasreinigungsverfahren mit Sprühtrocknung der Sonderabfallverbrennungsanlage Bibesheim 413

Bild 295: Nasses Abgasreinigungsverfahren mit Produktgewinnung der Abfallverbrennungsanlage Rugenberger Damm 414

Bild 296: Nasses Abgasreinigungsverfahren mit Sprühtrocknung der Abfallverbrennungsanlage Stellinger Moor 415

Bild 297: Nasses Abgasreinigungsverfahren mit Sprühtrocknung der Abfallverbrennungsanlage Offenbach 416

Bild 298: Nasses Abgasreinigungsverfahren der Abfallverbrennungsanlage Göppingen 417

Bild 299: Nasses Abgasreinigungsverfahren der Abfallverbrennungsanlage Stapelfeld 418

Bild 300: Sprühabsorptionsverfahren der Abfallverbrennungsanlage Hannover 419

Bild 301: Sprühabsorptionsverfahren der Abfallverbrennungsanlage Südwestthüringen 420

Bild 302: Konditioniert-trockenes Abgasreinigungsverfahren der Abfallverbrennungsanlage Hameln 421

Bild 303: Konditioniert-trockenes Abgasreinigungsverfahren mit zirkulierender Wirbelschicht der Abfallverbrennungsanlage Frankfurt 422

Bild 304: Trockene Abgasreinigung mit Natriumhydrogencarbonat mit zirkulierender Wirbelschicht der Abfallverbrennungsanlage Leudelange 423

Bild 305: Kombinationsverfahren aus Sprühabsorptions- und konditioniert-trockenem Abgasreinigungsverfahren der Abfallverbrennungsanlage Premnitz 424

Bild 306: Kombinationsverfahren aus konditioniert-trockenem und nassem Abgasreinigungsverfahren der Abfallverbrennungsanlage Breisgau 425

Bild 307: Kombinationsverfahren aus trockenem und konditioniert-trockenem Abgasreinigungsverfahren der Abfallverbrennungsanlage Delfzijl 426

Tabellenverzeichnis

1. Herkunft und Wirkung von Luftschadstoffen

Tabelle 1: Natürliche Zusammensetzung der trockenen Luft bei Normalnull 6

Tabelle 2: Verteilung der Korngröße im Reingas der Abfallverbrennungsanlage Geiselbullach/Olching (nach Gewebefilter) 8

Tabelle 3: Internationale Toxizitätsäquivalenzfaktoren nach NATO/CCMS (I-TEF) von 1988 sowie Toxizitätsäquivalenzfaktoren der Weltgesundheitsorganisation (WHO-TEF) von 1998 und 2005 12

Tabelle 4: Toxizitätsäquivalenzfaktoren der Weltgesundheitsorganisation (WHO-TEF) für polychlorierte Biphenyle von 1998 und 2005 14

Tabelle 5: Relative kanzerogene Potenzen (TEF) nach unterschiedlichen Modellen für die 16 EPA-PAK 15

2. Rechtliche Anforderungen an die Abgasbehandlung

Tabelle 6: Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen nach der europäischen Richtlinie über Industrieemissionen 30

Tabelle 7: Gesamtemissionsgrenzwerte nach der europäischen Richtlinie über Industrieemissionen für Zementöfen, in denen Abfälle mitverbrannt werden 32

Tabelle 8: Emissionsgrenzwerte ($c_{Verfahren}$) nach der europäischen Richtlinie über Industrieemissionen für Feuerungsanlagen, in denen Abfälle mitverbrannt werden 33

Tabelle 9: Gesamtemissionsgrenzwerte für Schwermetalle sowie Dioxine und Furane nach der europäischen Richtlinie über Industrieemissionen für Feuerungsanlagen, in denen Abfälle mitverbrannt werden 35

Tabelle 10: Emissionsgrenzwerte für Ableitungen von Abwasser aus der Abgasreinigung nach der europäischen Richtlinie über Industrieemissionen 36

Tabelle 11: Emissionsgrenzwerte nach der 17. BImSchV für Abfallverbrennungsanlagen 41

Tabelle 12: Emissionsgrenzwerte nach der 17. BImSchV für Anlagen zur Herstellung von Zementklinkern oder Zementen sowie für Anlagen zum Brennen von Kalk, in denen Abfälle mitverbrannt werden (sofern gefährliche Abfälle zu weniger als vierzig Prozent mitverbrannt werden) 42

Tabelle 13: Emissionsgrenzwerte für Schwefeldioxide, Stickstoffoxide und Kohlenstoffmonoxid nach der 17. BImSchV für Feuerungsanlagen, in denen Abfälle mitverbrannt werden 43

Tabelle 14: Emissionsgrenzwerte nach der 17. BImSchV für Feuerungsanlagen, in denen Abfälle mitverbrannt werden 44

Tabelle 15: Emissionsgrenzwerte nach der 17. BImSchV für sonstige Mitverbrennungsanlagen 45

Tabelle 16: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für die thermische Abfallbehandlung 45

Tabelle 17: Emissionsgrenzwerte (Tagesmittelwerte) für Großfeuerungsanlagen nach der 13. BImSchV 47

Tabelle 18: Emissionsgrenzwerte für thermische Abfallbehandlungsanlagen in verschiedenen Ländern im Vergleich 52

3. Schadstoffentstehung im Verbrennungsprozess und Primärmaßnahmen zur Reduzierung

Tabelle 19: Ort und Haupteinflussgrößen der Entstehung der Stickstoffoxide NO und NO_2 im Verbrennungsprozess 69

Tabelle 20: Siedepunkte einiger Metalle und Metallverbindungen 79

Tabelle 21: Transferkoeffizienten für Schwermetalle bei der Hausabfallverbrennung in der Müllverbrennungsanlage Sankt Gallen 83

Tabelle 22: Beispielhafte Rohgaszusammensetzung und Betriebsparameter der Abfallverbrennung am Austritt des Dampferzeugers 85

Tabelle 23: Beispielhafte Schadstoffgehalte im Rohgas einer Abfallverbrennungsanlage mit Rostfeuerungssystem am Austritt des Dampferzeugers 85

4. Chemische und physikalische Grundlagen der Schadstoffminderung

Tabelle 24: Wirk- und Reaktionsprinzipien zur Abscheidung von Schadstoffen in der Abgasreinigung 93

5. Sekundärmaßnahmen zur Minderung partikelförmiger Schadstoffe

Tabelle 25: Kenndaten verschiedener Staubabscheider 114

Tabelle 26: Kenndaten von Schwerkraftabscheidern 116

Tabelle 27: Kenndaten von Fliehkraftabscheidern 120

Tabelle 28: Kenndaten von Trockenelektrofiltern 129

Tabelle 29: Kenndaten von Nasselektrofiltern 134

Tabelle 30: Kenndaten von Gewebefiltern....136

Tabelle 31: Unterscheidungsformen von Gewebefiltern hinsichtlich der Bauform 137

Tabelle 32: Eigenschaften von Filterschlauchmaterialien....141

Tabelle 33: Kenndaten von Venturiwäschern....148

6. Sekundärmaßnahmen zur Minderung von Stickstoffoxiden

Tabelle 34: Produkteigenschaften einer Ammoniaklösung 155

Tabelle 35: Produkteigenschaften einer Harnstofflösung....156

Tabelle 36: Vergleich der Reduktionsmittel Ammoniakwasser und Harnstofflösung für den Einsatz in der SNCR im Kraftwerksbereich 167

Tabelle 37: Vergleich von SCR-Anlagenschaltungen 178

Tabelle 38: Unterscheidungsmerkmale für SCR-Katalysatoren....182

Tabelle 39: Desaktivierungstypen und -ursachen an Katalysatoren 192

7. Sekundärmaßnahmen zur Minderung organischer Schadstoffe sowie dampfförmiger Schwermetalle

Tabelle 40: Einsatzmöglichkeiten von physikalischen Adsorptionsmitteln zur Abscheidung von Schadstoffen in der Abgasreinigung von thermischen Abfallbehandlungsanlagen 208

Tabelle 41: Oberflächen und Porenvolumen von kohlenstoffhaltigen Adsorbentien 208

Tabelle 42: Produkteigenschaften von mahlaktiviertem Herdofenkoks....210

Tabelle 43: Sicherheitstechnische Kenndaten von Aktivkoksen und Aktivkohlen im Vergleich 212

Tabelle 44: Oberflächen und Porenvolumen von mineralischen Adsorbentien im Vergleich....216

8. Sekundärmaßnahmen zur Minderung saurer Schadgase

Tabelle 45: Sorptionsmittel- und Reaktionsprodukteigenschaften bei verschiedenen Abgasreinigungskonzepten zur Minderung saurer Schadgase....235

Tabelle 46: Produkteigenschaften von Natriumhydrogencarbonat....236

Tabelle 47: Produkteigenschaften von Natronlauge....238

Tabelle 48: Produkteigenschaften von Kalksteinmehl 239
Tabelle 49: Produkteigenschaften von Branntkalk 240
Tabelle 50: Produkteigenschaften von Kalkhydrat 244
Tabelle 51: Kenndaten verschiedener Sorptionsmittel im Vergleich 245
Tabelle 52: Eingesetzte Sorptionsmittel und Chemikalien bei nassen Abgasreinigungsverfahren 247
Tabelle 53: Vergleich verschiedener Absorptionsmittel für Schwefeldioxid im SO_2-Wäscher 257
Tabelle 54: Reaktionsprodukte bei der Umsetzung saurer Schadgase mit Kalkhydrat bei der quasi-trockenen Abgasreinigung von Abfallverbrennungsanlagen 279
Tabelle 55: Reaktionsprodukte bei der Umsetzung saurer Schadgase mit Natriumhydrogencarbonat bei der trockenen Abgasreinigung 299
Tabelle 56: Einsatzmengen von Kalkhydrat und Natriumhydrogencarbonat zur Abscheidung saurer Schadstoffe bei stöchiometrischer Umsetzung im Vergleich 301
Tabelle 57: Entstehende Reaktionsproduktmengen bei stöchiometrischer Umsetzung bei Einsatz von Kalkhydrat und Natriumhydrogencarbonat zur Abscheidung saurer Schadstoffe im Vergleich 301

9. Emissionen und Emissionsüberwachung

Tabelle 58: Zeitliche Anforderungen an behördlich angeordnete diskontinuierliche Emissionsmessungen 315
Tabelle 59: Normen für die Probenahme und Analyse bei der diskontinuierlichen Emissionsmessung 320
Tabelle 60: Schritte der in QAL 2 und AST durchzuführenden Funktionskontrolle 329
Tabelle 61: Gängige Messtechniken für Abgaskomponenten 331
Tabelle 62: Emissionen aus deutschen Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoffkraftwerken (Auswertungsjahr: 2007) 345

10. Behandlung und Entsorgung von festen Rückständen aus der Abgasreinigung

Tabelle 63: Typische chemische Zusammensetzung von Flugaschen und Filterstäuben aus der Abgasreinigung von Abfallverbrennungsanlagen 354

Tabelle 64: Hauptbestandteile von natürlichen Puzzolanen sowie Flugasche aus der Kohle- und Abfallverbrennung....356

Tabelle 65: Schwermetallkonzentrationen in Flugasche und Flugascheeluat im Vergleich zum daraus erzeugten Granulat nach dem Ash-Dec-Verfahren....364

Tabelle 66: Exemplarische Schwermetallkonzentrationen im Eluat eines verglasten Materials aus Flugasche....366

Tabelle 67: Zusammensetzung typischer Reaktionsprodukte bei Einsatz von Natriumhydrogencarbonat und der im Resolest-Verfahren erzeugten Rohsole....371

Tabelle 68: Zusammensetzung der im Resolest-Verfahren erzeugten Rohsole im Vergleich zur Annahmespezifikation in der Sodaproduktion....371

Tabelle 69: Verfahren zur Rückgewinnung von Nährstoffen aus Kraftwerksaschen....372

11. Gesamtkonzepte zur Reinigung von Abgasen

Tabelle 70: Exemplarische Investitionskosten für verschiedene Abgasreinigungssysteme im Vergleich (Beispiel für eine einlinige Abfallverbrennungsanlage mit 200.000 t/a)....392

Tabelle 71: Kosten von chemisch wirkenden Sorptionsmitteln in der Abgasreinigung....392

Tabelle 72: Kosten von physikalischen Adsorptionsmitteln in der Abgasreinigung....392

Tabelle 73: Kosten für die Entsorgung von Rückständen aus der Abgasreinigung....393

Tabelle 74: Investitionskosten für verschiedene Entstickungstechnologien im Vergleich (Beispiel für eine Abfallverbrennungsanlage mit einer Kapazität von 200.000 t/a und einem Abgasvolumen von 140.000 Nm^3/h f.)....397

Tabelle 75: Exemplarische Verbrauchswerte für verschiedene Entstickungstechnologien im Vergleich (Beispiel für eine Abfallverbrennungsanlage mit einer Kapazität von 200.000 t/a und einem Abgasvolumen von 140.000 Nm^3/h f., NO_x-Rohgaskonzentration: 450 mg/Nm^3, NO_x-Reingaskonzentration: 100 mg/Nm^3)....398

Tabelle 76: Abgasreinigungsverfahren thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (Stand: 2013)....400

Tabelle 77: Abgasreinigungsverfahren der Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen in Deutschland (Stand: 2013)....405

Inserentenverzeichnis

Vivis-Events



Seit 50 Jahren begleiten wir die Kreislaufwirtschaftsbranche und bieten den verschiedenen Akteuren ein Forum des Wissens- und Erfahrungsaustauschs.

Wir bieten aktuell vier Konferenzen im Jahr an, die sich jeweils einem bestimmten Themenbereich der Abfallwirtschaft widmen – Thermische Verfahren, Recycling und Sekundärrohstoffe, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle (einschl. Deponien) und Klärschlamm. Die Veranstaltungsreihen finden in einem einjährigen Rhythmus statt und stellen die aktuellen politischen, wirtschaftlichen, technischen und rechtlichen Entwicklungen vor.

Wir bieten eine Plattform, auf der sich die verschiedenen Akteure und Sektoren miteinander austauschen und vernetzen können. Unser persönliches Ziel ist, mit unseren Konferenzen zum Nachdenken anzuregen, Projekten Anschub zu geben und positive Entwicklungen in der Kreislaufwirtschaft voranzutreiben.

Das umfassende Wissen der Vortragenden wird in Fachbeiträgen ausführlich dokumentiert und im Anschluss an die Konferenzen in qualitativ anspruchsvollen Büchern und E-Books präsentiert.

Unsere aktuellen Konferenzen im Überblick:

Berliner Konferenz Abfallwirtschaft und Energie
Berliner Konferenz Metallkreisläufe
Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle
Berliner Klärschlammkonferenz

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51
16816 Nietwerder-Neuruppin
Tel. +49 3391 4545 0
E-Mail: registration@vivis.de

VIVIS.de



ERC Emissions-Reduzierungs-Concepte GmbH **S. 150, 387**

Bäckerstraße 13
DE-21244 Buchholz i.d.N.
Tel.: 0049-4181-216-100
Fax: 0049-4181-216-199
E-Mail: office@erc-online.de
www.erc-online.de



GEA Process Engineering A/S **S. 282**

Gladsaxevej 305
DK-2860 Soeborg
Tel.: 0045-39-54.54.54
Fax: 0045-39-54.58.00
E-Mail: gea-niro.chemical@gea.com
www.gea.com



LAB GmbH **S. 281, 350**

Bludenzer Str. 6
DE-70469 Stuttgart
Tel.: 0049-711-222.49.35-0
Fax: 0049-711-222.49.35-99
E-Mail: labgmbh@labgmbh.com
www.labgmbh.com



Lhoist Western Europe **S. 242, 378**

Rheinkalk GmbH
Am Kalkstein 1
DE-42489 Wülfrath
Tel.: 0049-2058-17-0
Fax: 0049-2058-17-22.10
E-Mail: info.deutschland@lhoist.com
www.lhoist.de



Mediengruppe UNIVERSAL **S. 466**

Kirschstraße 16
DE-80999 München
Tel.: 0049-89-54.82.17-0
Fax: 0049-89-55.55.51
www.universalmedien.de

RHOMBOS-VERLAG Bernhard Reiser **S. 92**

Kurfürstenstraße 17
DE-10785 Berlin
Tel.: 0049-30-261-94.61
Fax: 0049-30-261-63.00
E-Mail: verlag@rhombos.de
www.rhombos.de

TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky
Dorfstraße 51
DE-16816 Nietwerder
Tel: 0049-3391-45.45-0
Fax: 0049-3391-45.45-10
E-Mail: tkverlag@vivis.de
www.vivis.de

wandschneider + gutjahr ingenieurgesellschaft mbh **S. 37, 295**

Burchardstraße 17
DE-20095 Hamburg
Tel.: 0049-40-70.70.80-900
Fax: 0049-40-70.70.80-903
E-Mail: info@wg-ing.eu
www.wg-ing.eu

Stichwortverzeichnis

A

Abgaskonditionierung **275**, 290
Abgasrezirkulation 75
Abreinigungsfilter 97, 134, 135, **143**
Abscheidegrad 93, 97, 98, 113, 116, 118, 119, 123, 124, 126, 131, 145, 161, 169, 170, 187, 190, 199, 265, 275, 297, 300, 384
Absorption **103**, 228, 246, 255, 257, 264, 265, 280
Absorptionsisotherme 104, 106
Absorptionskoeffizient 105
Abwassereindampfung 273
Abwasserreinigung 268
ADIOX-Verfahren 266
Adsorption **99**, 107, 108, 146, 184, 191, 235, 266, 269, 360
Adsorptionsisotherme 102
Adsorptionsmittel
  kohlenstoffhaltig 208
  Kosten 392
  mineralische 215
Adsorptionsverfahren 207
agam
  siehe Temperaturmessung
Aktivator
  siehe Promotor
Aktivierungsenergie 106
Aktivitätskoeffizient 105, 106
Aktivitätskurve 193
Aktivkohle **208**, 210, 221, 225, 246, 265, 392
Aktivkoks 100, 101, 143, **209**, 212, 225, 246, 274, 294, 392
Aktivkomponente 181, 183
Aminradikale 158
Ammoniakabscheidung 266
Ammoniakeinbindung 175
Ammoniak-Schlupf 159, 168, 170, 171, 190, 195, 199, 266,
Ammoniak-Soda-Verfahren 236
Ammoniakwäscher 263
Ammoniakwasser **154**, 167
Ammoniumchlorid 195
Ammoniumhydrogensulfat 195
Ammoniumsalze 177, 179, 187, 194, **195**
Ammoniumsulfat 175, 195
Anatas 181
Antimon 20, 81
Arsen 20, 81
Ash-Dec-Verfahren 362, 363, 364
Atomabsorptionsspektroskopie 321, 336, 339
Autogene SNCR 71
Automatische Messeinrichtung 325, 326

B

BAM-Verfahren 372
Befeuchtungsmischer 289
Beladungskapazität 101
Bentonite 216
Bergversatz 372
Beste Verfügbare Technik 36
Betriebskosten 190, 307, 390, 391, 393, 395, 396, 397, 398
Big-Bag-Versatz 374
Bims 218
BioCon-Verfahren 372
Blei 20, 80
Boudouard-Reaktion 63
Branntkalk **239**, 243, 245, 258, 280, 303
Brennstoff-NO_x 69
Brennzahl 212
Brønsted-Säure-Zentren 184
Bundes-Immissionsschutzgesetz 39
BVT-Merkblätter 36

C

Cadmium 21, 80
CFD-Simulation 308
Chemisorption 99, 103, 104, 106
Chrom 21, 81
CMR-Stoffe 11
Cobalt 21
Coulombsches Gesetz 94

D

Dampfdruck 79, 80, 82, 105, 106
Decarbonisierung 303, 306
Dehydratisierung 303
De-Novo-Synthese 65, 179
Deponieklassen 375
Desaktivierungsmechanismen 191
Desorption 99, 100, 102, 103, 108

Deutsch-Formel 124
Dickstoffversatz 374
Dioxine
siehe PCCD
Direktentschwefelung 78, 238, 243, **302**, 303, 305
Drei-R-Prozess 360
Drei-T-Regel 62
Dreizehnte Bundes-Immissionsschutz-verordnung 46
Drift 330, 331
Driftgeschwindigkeit
siehe Wandergeschwindigkeit
Driftkontrolle 331, 338
Druckmessung 342
Durchmesser
aerodynamischer 7, 101, 119, 140, 266, 284

E

Eignungsprüfung 51, 326, 330
Eindüsgitter 180
Eindüslanzen 180
Eindüstechnik 161, 180
Einstoffdüsen 163
Einstoffzerstäubung 163
Elektrische Anziehungskraft 94
Elektrofilter
nass 129
trocken 121
Elementarschwefel 218
Eley-Rideal-Mechanismus 107
Emissionen 5
Chlorwasserstoff 18
Dioxine 12
Fluorwasserstoff 18
Furane 12
Gesamtstaub 8
polyaromatische Kohlenwasserstoffe 15
Schwefeldioxide 19
Schwermetalle 22
Stickstoffoxide 17
Thermische Abfallbehandlung 344, 345
Emissionsdatenfernübertragung 51, 327
Emissionsmessung
diskontinuierliche 315
kontinuierliche 324
Euler-Lagrange-Ansatz 308
Explosionsfähigkeit 212
Extraktive Messung 332

F

Fällungshilfsmittel 269
Faserschichtfilter 97, 134, 135, 143
Feinstaub **7**, 9, 146, 147, 148
Ferrox-Verfahren 361
Festbettadsorber 219
Festbett-Verfahren 218
Feuchtemessung 342
Filterflächenbelastung 124, 145, 146
Filterkopfgerät 321
Filterkuchen 139, 143, 270, 393
Filter/Kühlermethode 322
Filtermedium 95, 140
Filterschläuche 140
Filterschlauchmaterialien 141
Filtration **95**, 113, 134, 145, 146, 268, 270, 360
Flachschläuche 140
Flachstrahl 166
Flammenionisationsdetektor 338
Fliehkraft 94, 284
Fliehkraftabscheider 113, **116**
Flockungshilfsmittel 269
Flüchtigkeit 59, 80, 81
Flugstrom-Filterschicht-Verfahren 225, 279, 288
Flugstromreaktor 291
Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie 336
Fraktionsabscheidegrad 113, 125
Freistrahl 166
Füllkörperwäscher 249, 251, 252, 253, 262
Funktionskontrolle 325, 327, 329
Funktionsprüfung 51, 325, 326, 329
Furane
siehe PCDF

G

Gasphasenreaktion 99
Gegenstromadsorber 219, 220
Gekühltes-Absaugrohr-Methode 322
Gesamtstaub 7
Gewebefilter 135
Abreinigung 143
Bauformen 137
Filterelemente 139
Kenngrößen 145

Gipsgewinnung 272
Glimmtemperatur 212
Grenzkorn 118

H

Harnstofflösung **156**, 167
Henry-Daltonscher Verteilungssatz 105
Henrykoeffizient
siehe Absorptionskoeffizient
Henrysches Gesetz 105
Herdofenkoks
siehe Aktivkoks
Heterokoagulation **98**, 113, 130, 147
High-Dust-Rohgas-SCR 177, **179**, 186, 198
Hochtemperaturkatalysator 187
Hohlkegelstrahl 166
Honeycombs
siehe Wabenkatalysator
Hot-Spot 224
Hybridverfahren
siehe Kombinationsverfahren

I

Immissionen 5
Industrieemissionsrichtlinie 29
Infrarotdetektor 338
Infrarotspektroskopie
nicht dispersive 337
Infrarot-Strahlungspyrometer 173
In-situ-Messung 333
Interferenz 336, 337
Interferogramm 336
Investitionskosten 220, 391, 392, 396, 398
Isocyansäure 158, 159, 169, 177
I-TEF 12

K

Kalibrierfunktion 328
Kalibrierung
31, 51, 325, 326, 327, 330, 343
Kalkhydrat 225, **243**, 245, 246, 257, 259, 260, 274, 278, 280, 290, 294, 301, 303, 392
Kalklöscher 290
Kalkmilchwäscher 260
Kalkstein **238**, 245, 257, 258, 302, 392
Kalksteinwäscher 257
kalte Verbrennung 62
Kalzinierung 264, 303, 304
Kammerfilterpresse 270
Kapitalkosten 390, 391, 395
Katalysator
Aktivität 181, 187
Bauformen 184
Desaktivierung 191
Gifte 193
Kenngrößen 187
Regeneration 193
Selektivität 194
Stabilität 191
System 181
Katalyse 103, **106**, 181
Klassierung 343
Kohlenstoffmonoxid
Abscheidung 228
Bildung 62, 63
Herkunft und Wirkung 9
Messung 335
Kombinationsverfahren 153, 171, 199, 200 228, 284, **306**, 307, 355, 381, 389, 403, 424, 425, 426
Konditioniert-trockene Verfahren 287
Kontaktverdampfer 180
Kreuzstromadsorber
siehe Querstromadsorber
Kuchenfiltration 96
Kupfer 21, 80

L

Lachgas 169
Langmuir-Hinshelwood-Mechanismus 107
Langzeitprobenahmesystem 51, 322
Low-Dust-Rohgas-SCR 177, **179**
Low-NO_x-Brenner 76
Luftschadstoffe 3
Luftstufung 74
Luftverunreinigungen 5
Luftzusammensetzung 6

M

Magnesiumhydroxidwäscher 263
Makroporen 101
Mangan 21, 81
Massenkraftabscheider 113, **114**
Meerwasserwäscher 263
Mehrkomponentenmessung 336, 337
Membranfilter 141

Memory-Effekt 66, 266
Mesoporen 101
Messaufgabe 319
Messbericht 320
Messplan 319
Messplatz 318
Messstrategie 319
Messstrecke 317
Messunsicherheit 319, 320, 325, 328, 343
Michelson-Interferometer 336
Mikroporen 101
Mindestzündenergie 212
Mischer
  statisch 181
Mischsorbentien 218, 246
Mischungsregel 31
Multirecycling-Prozess 360
Multiventuristufe 262, 266
Multizyklone
  Siehe Fliehkraftabscheider

N

Nadelfilz 135, 140
Nassabscheider 98, 113, **147**
Nasselektrofilter 129
Nassverfahren **246**, 391
Natriumbicarbonat
  Siehe Natriumhydrogencarbonat
Natriumhydrogencarbonat
  236, 245, 298, 369, 392
Natriumsulfide 218
Natriumsulfitwäscher 263
Natronlauge **237**, 246, 257, 261, 271, 392
Natronlaugewäscher 248, **261**
Nickel 22
Niederschlagselektrode 122, 130
Niederschlagsfläche 124, 125, 126, 127
Niedertemperaturkatalysator 187, 193
NO-Recycle-Prozess 71

O

Oberflächenfiltration 96, 141
Organische Schadstoffe
  Abscheidung 207
  Bildung 64
  Herkunft und Wirkung 10
  Probenahme und Analytik 322
Oxianionen 81
Oxidationskatalysator 63, 199, **228**

P

Paramagnetische Messung 341
Partikel
  siehe Staub
PBT-Substanzen 11
PCDD/PCDF
  Abscheidung 205, 266, 274, 294
  Bildung 64
  Herkunft und Wirkung 10
  Probenahme und Analytik 322
Pfadtemperatur 172
Physisorption 99, 104, 105
Pitch 189, 190
Planfilterkopfgerät 321
Plattenelektrofilter 123
Plattenkatalysator 179, 184
Pneumatikzerstäubung 163
Polychlorierte Biphenyle 13
Polychlorierte Dibenzofurane
  siehe PCDF
Polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen
  siehe PCDD
Polycyclische aromatische
  Kohlenwasserstoffe 14, **66**
Porenradienverteilung 108, 210, 211,
  215, 303
Prandtl-Rohr 340
Präzision 330, 331
Precoating 139, 142
Primärmaßnahmen 59
Promotor 183
Promptes NO_x 73
p/T-Diagramm 304
Pulse-Jet-Verfahren 143
Puzzolanität 356, 357, 358

Q

Qualitätsregelkarten 330
Qualitätssicherungsstufen 325
Quasitrockene Verfahren **274**, 391
Quecksilber 82
  Abscheidung 228, 264
  Herkunft und Wirkung 22
  Messung 339
  Oxidation 198
Querstromadsorber 219, 220

R

Raoultsches Gesetz 105
Raumgeschwindigkeit 187

Reentrainment 123
Regelkarten
siehe Qualitätsregelkarten
Regenerierungsdruckverlust 144
Reihenfilter 138
Reingas-SCR
siehe Tail-End-SCR
Rektifikation
siehe Salzsäuregewinnung
Resolest-Verfahren 369
Rohgaszusammensetzung 84
Röhrenelektrofilter 123
Rotationszerstäuber 284
Rückgewinnungsverfahren 369
Metalle 369
Phosphat 371
Rohstoffe Sodaproduktion 369
Rücksprühen 128
Rundfilter 138
RüPA-Verfahren 372
Rutilisierung 183, 192

S

Salzsäuregewinnung 271
Sauerstoff-Grenzkonzentration 212, 224
Sauerstoffmessung 341
saurer Regen 19
Saure Schadgase
Abscheidung 231, 233
Bildung 78
Herkunft und Wirkung 18
Messung 335
Schmelzverfahren
siehe Verglasungsverfahren
Schüttschichtfilter 98, 134, 146
Schwebstaub
siehe Gesamtstaub
Schwefelsäuretaupunkt 128
Schwerkraftabscheider 113, **114**
Schwermetalle
Abscheidung 111, 205, 264, 266, 268, 274, 294
Bindungsformen und Verteilung 79
Herkunft und Wirkung 20
Messung 321, 339
SCR-Verfahren **176**, 386, 396
Sekundärmaßnahmen 74
Selbstentzündungsfähigkeit 213
Selbsterwärmung 224
Selektive katalytische Reduktion
siehe SCR
Selektive nicht-katalytische Reduktion
siehe SNCR
Siebzehnte Bundes-Immissionsschutz-verordnung 40
Sinterfilter 95
Sinterungsverfahren 361
Smog 17
SNCR-Verfahren **157**, 386, 396
Sorption 99
Sorptionsmittel
calciumbasiert 237
Kosten 392
natriumbasiert 235
Speicherfilter 97, 134, 146
Sperreffekte 96
Spezialkalkhydrate 243, 245, 392
Spray 163, 166
Sprühabsorptionsverfahren 280
Sprühelektrode 122, 130
Sprühtrockner 274
Sprühturmwäscher 147, 249, 251, 259, 260
Stabilisierungsverfahren 361
Standardreferenzverfahren 320, 328
Standortfaktoren 389
Stapelversatz 373
Staub
Abscheidung 111, 113, 151
Bildung 60
Herkunft und Wirkung 7
Messung 333
Staubwiderstand 126, 127, 128, 131
Staudruckmessung 339
Stickstoffoxide 16
Abscheidung 151
Bildung 67
Herkunft und Wirkung 59
Messung 335
Stöchiometriefaktor 161, 169, 277, 279, 280, 297, 298, 395
Stoßionisation 122, 130
Strahlungsformen 166
Streulichtmessung 335
Stützkörbe 142
Submikroporen 101
Suevit 217
Sulfatisierung 303

T

Tail-End-SCR 177, **179**, 186
Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft 46
Temperaturmessung 342
akustische 172
pyrometrisch 173

Thermisches NO_x 73
Thermolyse 158, 169, 177
Tiefenfiltration 96, 97, 135, 141, 146
Titandioxid 181
Toxizitätsäquivalent 11
Toxizitätsäquivalenzfaktor 11
Trägersystem 181
Transferkoeffizienten 82, 84
Transmission 6
Transmissionsmessung 334
Trass
siehe Suevit
Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz 49
Trocken-Additiv-Verfahren 302
siehe Direktentschwefelung
Trockenlöschung 287, 290
Trockenverfahren **294**, 391
Tropfenabscheider 255

U

Ultraschall-Durchflussmessung 339
Umsatzzahl 187
Untertagedeponierung 375

V

Validierung 320, 325, 327, 328, 343
Vanadium 22, 81
Vanadiumpentoxid 181
Van-der-Waals-Kräfte 99, 103
Variabilität 328, 329
Variabilitätsprüfung 328
Venturiwäscher 98, 113, **147**, 148, 249, 251, 266
Verdampfungskühler 288
Verdünnungsmethode 322
Verfestigungsverfahren 355
Verfügbarkeit 261, 290, 326, 330, 331, 390, 394
Verglasungsverfahren 364, 365
Very-Low-NO_x-Verfahren 74
Vollkegelstrahl 166
Volumenstrommessung 339

W

Wabenkatalysator 184
Wanderbettadsorber 218, 224, 384, 396
Wanderbettverfahren 146
Wandergeschwindigkeit 123, 124, 125, 126
Waschverfahren 359
Wasserstoffentstehung 359
Wellman-Lord-Verfahren 263
WHO-TEF 12
Winkeldüsen 161, 162
Wirkungsgrad
siehe Abscheidegrad
Wirtschaftlichkeit 390
Wolframtrioxid 183

Z

Zeemann-Effekt 339
Zeolithe 215
Zink 22, 80
Zinn 22
Zirkoniumdioxid-Sonde 341
Zirkulierender Wirbelschichtreaktor 293
Zuordnungswerte 375
Zweistoffdüsen 286, 163
Zyklon
siehe Fliehkraftabscheider