

Inhalt

Vorwort XI

- 1 Schwefel und anorganische Schwefelverbindungen** 1
Kurt-Wilhelm Eichenhofer, Karin Huder, Egon Winkler, Karl H. Daum
- 2 Anorganische Stickstoffverbindungen** 173
Thomas Böhlend, Ernst Gail, Stephen Gos, Theo van Hoek, Rupprecht Kulzer, Bernd Langanke, Willi Ripperger, Peter M. Schalke, Hans Jörg Wilfinger
- 3 Phosphor und Phosphorverbindungen** 343
*Heinz Harnisch, Gero Heymer, Werner Klose und Klaus Schrödter
Bearbeitet und aktualisiert von Rob de Ruiter und Willem Schipper*
- 4 Chlor, Alkalien und anorganische Chlorverbindungen** 427
Klaus Blum, Peter Schmittinger
- 5 Natriumchlorid und Alkalicarbonate** 545
Andreas Leckzik, Franz Götzfried, Leon Ninane
- 6 Anorganische Verbindungen des Fluors** 599
Albrecht Marhold, Jens Peter Joschek
- 7 Borverbindungen** 657
Birgit Bertsch-Frank, Cordula Terbrack
- 8 Peroxoverbindungen** 675
Gustaaf Goor, Eberhard Hägel, Sylvia Jacobi, Wolfgang Leonhardt, Werner Zeiss, Klaus Zimmermann
- 9 Carbide und Kalkstickstoff** 767
*Friedrich Wilhelm Dorn, Herwig Höger, Klaus Liethschmidt, Georg Strauß
Neu bearbeitet von Klaus Englmaier*

10 Siliciumverbindungen 803

Dieter Kerner, Norbert Schall, Wolfgang Schmidt, Ralf Schmoll, Jost Schürtz

11 Kohlenstoffprodukte 891

*Gerd Collin, Wilhelm Frohs, Jürgen Behnisch, Gerd-Peter Blümer,
Peter K. Bachmann, Peter Scharff*

12 Wasser 1041

Jutta Jahnelt, Markus Ziegmann, Fritz H. Frimmel

Stichwortverzeichnis 1099

1

Schwefel und anorganische Schwefelverbindungen

Kurt-Wilhelm Eichenhofer (1, 3–7), Karin Huder (2), Egon Winkler (3, 4),
Karl H. Daum (3, 4)

- 1 Erzeugung und Verbrauch von Schwefel und anorganischen Schwefelverbindungen 5**
 - 1.1 Rohstoffsituation von Schwefel und Schwefel-Äquivalenten 5
 - 1.2 Mengenentwicklung von Schwefel- und Schwefelsäureerzeugung/-verbrauch 7
 - 1.3 Verwendung von Schwefel und Schwefelsäure 13
- 2 Elementarer Schwefel 16**
 - 2.1 Eigenschaften 16
 - 2.1.1 Physikalische Eigenschaften 16
 - 2.1.2 Chemische Eigenschaften 18
 - 2.2 Entschwefelung von Erdgas, Erdöl und Kohle 20
 - 2.2.1 Entschwefelung von Erdöl 20
 - 2.2.2 Entschwefelung von Gasen 21
 - 2.2.2.1 Absorption mit Hilfe von chemischen oder physikalischen Lösemitteln, Herstellung von Gasen mit aufkonzentriertem H_2S 21
 - 2.2.2.2 Direkte Umsetzung von H_2S in Redox-Prozessen 22
 - 2.2.2.3 Biologische Entfernung 22
 - 2.2.2.4 Claus-Verfahren 22
 - 2.2.2.5 Selectox 25
 - 2.3 Entgasung 25
 - 2.4 Reinheit 26
 - 2.5 Endgasreinigung 27
 - 2.5.1 Katalytische Reinigung von Claus-Tailgas oberhalb des Schwefeltaupunktes 27
 - 2.5.2 Katalytische Reinigung von Claus-Tailgas unterhalb des Schwefeltaupunktes 27
 - 2.5.3 Prozesse basierend auf Claus-Tailgas in flüssiger Phase 29
 - 2.5.4 Prozesse mit reduziertem Claus-Tailgas 30
 - 2.5.5 Weitere Prozessvarianten 30
 - 2.6 Verfestigung, Lagerung und Transport von Schwefel 32

- 2.6.1 Verfestigung 32
- 2.6.2 Lagerung und Transport 33

3 Schwefeldioxid 34

- 3.1 Eigenschaften von Schwefeldioxid 34
- 3.2 Bereitstellung schwefeldioxidhaltiger Gase 35
 - 3.2.1 Überstöchiometrische Schwefelverbrennung 37
 - 3.2.2 Unterstöchiometrische Schwefelverbrennung 40
 - 3.2.3 Herstellung von Dampf bei der Schwefelverbrennung 42
 - 3.2.4 SO₂-haltige Gase aus Röst- und Spaltprozessen für die Schwefelsäureherstellung 44
 - 3.2.4.1 SO₂-haltige Gase aus metallurgischen Prozessen 44
 - 3.2.4.2 SO₂-haltige Gase aus der thermischen Spaltung von flüssigen schwefelsäurehaltigen Abfällen 44
 - 3.2.4.3 SO₂-haltige Gase aus der thermischen Spaltung von Eisensulfat und Abfallsäure bei der Titandioxidherstellung 47
 - 3.2.4.4 SO₂-haltige Gase aus der thermischen Spaltung von Calciumsulfaten 49
- 3.3 Reinigung von SO₂-haltigen Gasen 50
 - 3.3.1 Kühlung und Elektrostatische Gasreinigung (EGR) 51
 - 3.3.2 Waschverfahren 52
 - 3.3.3 Quecksilberabtrennung 55
 - 3.3.4 Arsenentfernung 57
- 3.4 Herstellung von flüssigem SO₂ 58
- 3.5 Lagerung und Verwendung von flüssigem SO₂ 63

4 Schwefelsäure 64

- 4.1 Eigenschaften von Schwefelsäure und Oleum 65
- 4.2 Herstellung von SO₃ aus SO₂ durch Katalyse 67
 - 4.2.1 Katalysatoren 73
 - 4.2.2 Technische Umsetzung der Gleichgewichtsreaktion 76
 - 4.2.2.1 Unsteady-State-Verfahren 80
 - 4.2.2.2 Einfachkatalyse und Doppelkatalyse (Steady-State-Verfahren) 81
 - 4.2.3 Verbleib des Katalysators 87
- 4.3 Absorption von SO₃ in Schwefelsäure 89
 - 4.3.1 Gegenstrom- und Gleichstromabsorption 89
 - 4.3.2 Arbeitsbereich der Schwefelsäureabsorption 90
- 4.4 Verfahrensschritte des Schwefelsäureprozesses 92
 - 4.4.1 Gasteil 92
 - 4.4.1.1 Kontaktapparat, Kontakthorde 93
 - 4.4.1.2 Gas/Gas-Wärmeaustauscher 96
 - 4.4.1.3 Luftvorwärmung 97
 - 4.4.1.4 Verdichter 97
 - 4.4.1.5 Kamin 98
 - 4.4.2 Säureteil 99
 - 4.4.2.1 Trockner und Absorber 100

- 4.4.2.2 Säurekühler 103
- 4.4.2.3 Pumpen 106
- 4.4.2.4 Gasfilter 107
- 4.4.2.5 NO_x-Entfernung 109
- 4.4.3 Dampfteil 110
 - 4.4.3.1 Speisewasservorwärmung 110
 - 4.4.3.2 Dampfkessel 110
 - 4.4.3.3 Economiser 112
 - 4.4.3.4 Überhitzer 112
 - 4.4.3.5 Dampfturbine 113
- 4.5 Energiegewinnung im Schwefelsäureprozess 113
 - 4.5.1 Gesamtprozess 114
 - 4.5.2 Energiebetrachtung bei der Kontaktierung 116
- 4.6 Abgasreinigung 117
- 4.7 Verfahrensdarstellung einer Anlage mit Schwefelverbrennung und Doppelkatalyse 120
- 4.8 Verfahrensdarstellung einer Anlage mit Erzzröstung und Doppelkatalyse 122
- 4.9 Verfahrensdarstellung einer Anlage für niedrigere SO₂-Gehalte mit Einfachkatalyse und Endgaswäsche 123
- 4.10 Herstellung von Oleum und Schwefeltrioxid 124
- 4.11 Schwefelsäurekonzentrierung 127
- 4.12 Einstellung verschiedener Schwefelsäure- und Oleum-Konzentrationen 129
- 4.13 Lagerung und Transport von Schwefelsäure und Oleum 129
- 4.14 Werkstoffe 130
- 4.15 Prozessüberwachung, Qualität und Analytik 133

5 Herstellung und Verwendung der anorganischen Schwefelverbindungen 136

- 5.1 Bisulfite 136
 - 5.1.1 Natriumbisulfit 136
 - 5.1.2 Magnesiumbisulfit (Mg(HSO₃)₂) 137
 - 5.1.3 Ammoniumbisulfit (NH₄HSO₃) 138
- 5.2 Natrium/Kalium-Sulfit/Disulfit 138
 - 5.2.1 Natriumsulfit (Na₂SO₃) 138
 - 5.2.2 Kaliumsulfit (K₂SO₃) 139
 - 5.2.3 Natriumdisulfit (Na₂S₂O₅) 139
 - 5.2.4 Kaliumdisulfit (K₂S₂O₅) 140
 - 5.2.5 Magnesiumsulfit (MgSO₃) 140
- 5.3 Thiosulfat 141
 - 5.3.1 Ammoniumthiosulfat ((NH₄)₂S₂O₃) 141
 - 5.3.2 Natriumthiosulfat (Na₂S₂O₃) 142
- 5.4 Natriumdithionit (Na₂S₂O₄) 143
- 5.5 Natriumhydrogensulfid (NaHS) und Natriumsulfid (Na₂S) 146

5.6	Schwefelchloride	146
5.7	Thionylchlorid (SOCl ₂)	147
5.8	Sulfurylchlorid (SO ₂ Cl ₂)	148
5.9	Anorganische Sulfonsäuren	149
5.10	Schwefelsäure electronic grade (H ₂ SO ₄)	150
5.11	Natriumhydrogensulfat (NaHSO ₄)	152
5.12	Natriumsulfat/Kaliumsulfat	152
5.13	Ammoniumsulfat ((NH ₄) ₂ SO ₄)	154
5.14	Calciumsulfate (CaSO ₄ · xH ₂ O)	155
5.15	Zinksulfat (ZnSO ₄)	157
5.16	Bariumsulfat (BaSO ₄)	158
5.17	Eisensulfate (Fe(II), Fe(III)SO ₄)	158
5.18	Schwefelkohlenstoff (CS ₂)	160

6 Vorschriften in Deutschland/EU 162

6.1	Bestimmungen der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft in Deutschland	162
6.2	Best available techniques (BAT) für Schwefel- und Schwefelsäureproduktion	164
6.3	Verordnungen	165
6.3.1	Störfallstoffe SO ₂ , SO ₃	165
6.3.2	Luftgrenzwerte für SO ₂ , SO ₃ , H ₂ SO ₄	166
6.3.3	Krebserzeugende Wirkung von schwefelsäurehaltigen Aerosolen	167

7 Literatur 168

2

Anorganische Stickstoffverbindungen

*Thomas Böhland, Ernst Gail, Stephen Gos, Theo van Hoek, Rupprecht Kulzer,
Bernd Langanke, Willi Ripperger, Peter M. Schalke, Hans Jörg Wilfinger*

- 1 **Entwicklung der Stickstoffindustrie** 177
- 2 **Ammoniak** 180
 - 2.1 Einleitung 180
 - 2.2 Synthesegasherstellung aus Erdgas durch Steam-Reforming 185
 - 2.2.1 Erdgasreinigung 185
 - 2.2.2 Steam-Reforming 186
 - 2.2.2.1 Betriebsbedingungen und Katalysatoren 186
 - 2.2.2.2 Technische Ausführungsformen konventioneller Primär- und Sekundärreformer 191
 - 2.2.2.3 Verfahren zur Entlastung des Primärreformers 199
 - 2.2.3 Konvertierung des CO 203
 - 2.2.4 CO₂-Entfernung 206
 - 2.2.5 Methanisierung 208
 - 2.3 Die Ammoniak-Synthese 209
 - 2.3.1 Physikalisch-chemische Grundlagen und Katalysatoren 209
 - 2.3.2 Genereller Aufbau einer Syntheseschleife 215
 - 2.3.3 Synthesegas-Kompression 217
 - 2.3.4 Synthesereaktoren (Konverter) 218
 - 2.3.5 HD-Dampfgewinnung 224
 - 2.3.6 Aufarbeitung der Purge- und Entspannungsgase 225
 - 2.3.6.1 Wasserstoffrückgewinnung durch Tieftemperatur-Zerlegung 226
 - 2.3.6.2 Wasserstoffrückgewinnung durch Membranverfahren 226
 - 2.4 Beispiele von Einstranganlagen auf Erdgasbasis 227
 - 2.4.1 Ammoniakverfahren der Firma Uhde 228
 - 2.4.1.1 Konventionelles Uhde-Verfahren (Low-Energy Concept) mit zwei Konvertern 229
 - 2.4.1.2 Das Uhde Zweidruckverfahren 232
 - 2.4.2 Ammoniakverfahren der Firma Haldor-Topsøe 232
 - 2.4.3 Ammoniakverfahren der Firma Halliburton KBR (früher: Kellogg, Brown & Root) 235

2.4.4	MEGAMMONIA-Konzept von Lurgi und Ammonia Casale	237	5
2.5	Ammoniakanlagen auf Basis von Schwerölen und Kohle	238	5.1
2.5.1	Synthesegasherstellung aus Schwerölen	238	5.2
2.5.2	Synthesegasherstellung aus Kohle	242	
2.6	Kapazitäten, Produktion und Handel	242	6
2.7	Lagerung und Transport	244	6.1
			6.2
3	Salpetersäure	248	6.3
3.1	Oxide des Stickstoffs	248	6.4
3.2	Eigenschaften und Verwendung von Salpetersäure	250	
3.3	Herstellung von Salpetersäure	251	6.5
3.3.1	NH ₃ -Oxidation	253	6.5.1
3.3.1.1	Ammoniak-Oxidation mit Luft	253	6.5.2
3.3.1.2	Ammoniak-Oxidation mit Sauerstoff	256	
3.3.2	Oxidation des Stickoxids und Gewinnung von Salpetersäure	256	6.5.3
3.3.3	Verfahrensvarianten	259	6.5.4
3.3.4	Typische Konstruktionen und Werkstoffe	262	6.6
3.3.4.1	Brenner und Abhitzeessel	262	6.6.1
3.3.4.2	Absorptionstürme	263	6.6.2
3.3.4.3	Maschinen	264	
3.3.4.4	Werkstoffe	265	7
3.4	Emissionen von Stickoxiden (nitrosen Gasen)	266	7.1
3.4.1	Katalytische Reinigungsverfahren	267	7.2
3.4.1.1	Selektive katalytische Reinigung	267	7.2.1
3.4.1.2	Katalytische Reinigung mit Kohlenwasserstoffen	268	7.2.2
3.4.2	Sonstige Reinigungsverfahren	268	7.2.3
3.5	Herstellung von konzentrierter Salpetersäure	269	7.2.4
3.5.1	Herstellung aus wasserhaltiger Salpetersäure	270	7.3
3.5.1.1	Konzentrierung mit Schwefelsäure	270	
3.5.1.2	Konzentrierungen mit Nitrat-Lösungen	271	8
3.5.2	Herstellung von wasserfreier Salpetersäure nach dem direkten Verfahren	272	8.1
			8.2
3.6	Verarbeitung von Abfallsäure	275	8.2.1
			8.2.2
			8.2.3
4	Salze der Salpetersäure und Salpetrigen Säure	275	8.2.4
4.1	Natriumnitrat	275	8.2.5
4.1.1	Natriumnitrat aus Chilesalpeter	275	8.3
4.1.2	Natriumnitrat und Natriumnitrit aus nitrosen Gasen	276	8.3.1
4.2	Ammoniumnitrat	277	8.3.2
4.3	Ammoniumnitrit	281	8.3.3
4.4	Calciumnitrat	281	8.4
4.5	Kaliumnitrat	281	8.4.1
			8.4.2
			8.4.2.

Ammoniumsalze 282

Ammoniumchlorid 282

Ammoniumcarbonate und Ammoniumcarbamate 283

Harnstoff 284

Einleitung 284

Physikalische Eigenschaften 285

Chemische Eigenschaften und Verwendung 286

Physikalisch-chemische Grundlagen der technischen

Harnstoffherstellung 288

Technische Prozesse 292

Stamicarbon CO₂-Stripping-Prozess 292

Das UREA 2000plus-Verfahren mit Pool-Kondensator oder

Pool-Reaktor 294

Der ACES-Prozess der Toyo Engineering Company 297

Andere Harnstoffverfahren 301

Herstellung und Lagerung von festem Harnstoff 303

Prillung und Granulation 303

Lagerung 306

Hydrazin 307

Wirtschaftliche Bedeutung 307

Herstellung 308

Raschig-Verfahren 308

Harnstoffverfahren 309

Bayer-Verfahren 310

H₂O₂-Verfahren 311

Verwendung 312

Hydroxylamin¹⁾ 313

Wirtschaftliche Bedeutung 313

Produktionsverfahren 313

Übersicht 313

Das modifizierte Raschig-Verfahren 314

Katalytische Hydrierung von Stickstoffoxid 315

HPO-Verfahren 316

Vergleich der technischen Verfahren 317

Freie Base Hydroxylamin 317

Herstellung 317

Physikalische Eigenschaften 318

Chemische Eigenschaften 318

Hydroxylammoniumsalze 318

Herstellung 318

Eigenschaften 319

1. Physikalische Eigenschaften 319

- 8.4.2.2 Chemische Eigenschaften 319
- 8.5 Toxikologie, Ökologie 320
- 8.6 Verwendung 320

- 9 Blausäure, Cyanide und Cyanate 321**
 - 9.1 Historisches 321
 - 9.2 Cyanwasserstoff 321
 - 9.2.1 Eigenschaften 321
 - 9.2.2 Herstellverfahren 322
 - 9.2.2.1 Überblick 322
 - 9.2.2.2 Andrussow-Verfahren 323
 - 9.2.2.3 BMA-Verfahren 324
 - 9.2.2.4 Shawinigan-Verfahren 324
 - 9.2.2.5 Aufarbeitung der Prozessgase 325
 - 9.2.2.6 Sohio-Verfahren 326
 - 9.2.3 Lagerung und Transport 327
 - 9.2.4 Verwendung 327
 - 9.3 Alkalicyanide 328
 - 9.3.1 Eigenschaften 328
 - 9.3.2 Herstellung 328
 - 9.3.3 Verwendung 329
 - 9.4 Komplexe Eisencyanide 329
 - 9.4.1 Alkali- und Erdalkalihexacyanoferrat(II) 329
 - 9.4.2 Kaliumhexacyanoferrat(III) 330
 - 9.4.3 Eisenblau-Pigmente 331
 - 9.5 Cyanate 332
 - 9.6 Thiocyanate 333
 - 9.6.1 Eigenschaften und Verwendung 333
 - 9.6.2 Herstellverfahren 333
 - 9.6.2.1 Herstellung von Ammoniumthiocyanat aus Ammoniak und Schwefelkohlenstoff 333
 - 9.6.2.2 Herstellung von Ammoniumthiocyanat aus Kokereigas 334
 - 9.6.2.3 Herstellung von Natriumthiocyanat aus Ammoniumthiocyanat 334
 - 9.6.2.4 Herstellung von Natriumthiocyanat aus Natriumcyanid 334
 - 9.7 Umweltschutz und Toxikologie 334
 - 9.7.1 Toxizität von Blausäure und Cyaniden 334
 - 9.7.2 Entgiftung cyanidhaltiger Abfallstoffe 335
 - 9.8 Zusammenfassung und Ausblick 336

- 10 Literatur 337**

3

Phosphor und Phosphorverbindungen

Aus der 4. Auflage von

Heinz Harnisch, Gero Heymer, Werner Klose und Klaus Schröder

Bearbeitet und aktualisiert von

Rob de Ruiter und Willem Schipper

- 1 Rohphosphate 346**
 - 1.1 Vorkommen und Zusammensetzung 346
 - 1.2 Umfang der Gewinnung und Verwendung 347
 - 1.3 Abbau- und Anreicherungsverfahren 348

- 2 Nasschemischer Aufschluss von Rohphosphaten 348**
 - 2.1 Aufschluss mit Schwefelsäure 349
 - 2.1.1 Nassphosphorsäure 349
 - 2.1.1.1 Produktionsumfang und Verwendung 349
 - 2.1.1.2 Rohstoffe 350
 - 2.1.1.3 Physikalische und chemische Grundlagen 350
 - 2.1.1.4 Grundoperationen bei der Herstellung 352
 - 2.1.1.5 Herstellverfahren 354
 - 2.1.1.6 Konzentrierung 355
 - 2.1.1.7 Reinigung 359
 - 2.1.2 Superphosphate 361
 - 2.1.2.1 Produktionsumfang und Verwendung 361
 - 2.1.2.2 Physikalische und chemische Grundlagen 362
 - 2.1.2.3 Herstellverfahren 363
 - 2.1.3 Verbleib und Verwendung von Nebenprodukten 365
 - 2.1.3.1 Deponierung 365
 - 2.1.3.2 Gipsprodukte 366
 - 2.1.3.3 Fluoride 366
 - 2.1.3.4 Uran und Seltene Erden 367
 - 2.2 Aufschluss mit anderen Säuren 368

- 3 Thermischer Aufschluss von Rohphosphaten 369**
 - 3.1 Elektrothermischer Aufschluss – Phosphorherstellung 369
 - 3.1.1 Historisches 369
 - 3.1.2 Produktionsumfang und Verwendung 370
 - 3.1.3 Rohstoffe 371
 - 3.1.4 Chemische und physikalische Grundlagen 372
 - 3.1.5 Beschreibung der Verfahren 373
 - 3.1.5.1 Herstellung der Phosphatformlinge 373
 - 3.1.5.2 Phosphorofenkonstruktionen 374
 - 3.1.5.3 Ofengasreinigung und Phosphorkondensation 376
 - 3.1.6 Qualität des anfallenden Phosphors 378
 - 3.1.7 Handhabung und Verwertung der Nebenprodukte 379
 - 3.1.7.1 Schlacke 379
 - 3.1.7.2 Ferrophosphor 379
 - 3.1.7.3 Filterstaub 380
 - 3.1.7.4 Kohlenmonoxid 380
 - 3.1.7.5 Phosphorschlamm 380
 - 3.1.7.6 Phosphorabwasser 380
 - 3.1.8 Roter Phosphor 381
- 4 Thermische Phosphor- und Polyphosphorsäure 382**
 - 4.1 Produktionsumfang und Verwendung 382
 - 4.2 Chemische und physikalische Grundlagen 383
 - 4.3 Herstellverfahren 385
- 5 Phosphorsaure Salze 388**
 - 5.1 Chemische und physikalische Grundlagen 388
 - 5.2 Natrium-, Kalium- und Ammoniumphosphate 391
 - 5.2.1 Produktionsumfang und Verwendung 391
 - 5.2.2 Herstellverfahren 393
 - 5.2.2.1 Orthophosphate 393
 - 5.2.2.2 Kondensierte Phosphate 394
 - 5.2.3 Calcium- und Magnesiumphosphate 401
 - 5.2.3.1 Produktionsumfang und Verwendung 401
 - 5.2.4 Herstellverfahren 401
 - 5.2.4.1 Calciumdihydrogenphosphat 401
 - 5.2.4.2 Calciumhydrogenphosphat 402
 - 5.2.4.3 Andere Calciumphosphate 403
 - 5.3 Sonstige Ortho- und Polyphosphate 403
 - 5.4 Eutrophierung, Phosphatfällung in Kläranlagen 404
- 6 Sonstige anorganische Phosphorverbindungen 405**
 - 6.1 Phosphorhalogenide 405
 - 6.1.1 Produktionsumfang und Verwendung 405
 - 6.1.2 Chemische und physikalische Grundlagen 406

- 6.1.3 Herstellverfahren 407
 - 6.1.3.1 Phosphortrichlorid 407
 - 6.1.3.2 Phosphorpentachlorid 407
 - 6.1.3.3 Phosphoroxidchlorid 408
 - 6.1.3.4 Phosphorsulfidchlorid 408
- 6.2 Phosphoroxide 408
 - 6.2.1 Produktionsumfang und Verwendung 408
 - 6.2.2 Herstellverfahren 409
- 6.3 Phosphorsulfide 409
 - 6.3.1 Produktionsumfang und Verwendung 409
 - 6.3.2 Herstellverfahren 410
- 6.4 Phosphide, Phosphorwasserstoff und Hypophosphite 411

- 7 Organische Verbindungen des Phosphors 412**
 - 7.1 Neutrale Phosphorsäureester 412
 - 7.2 Saure Phosphorsäureester 414
 - 7.3 Saure Dithiophosphorsäureester 415
 - 7.4 Neutrale Ester der Thio- und Dithiophosphorsäure 415
 - 7.5 Neutrale Di- und Triester der Phosphorigen Säure 416
 - 7.6 Phosphonsäuren 418
 - 7.7 Phosphane 420

- 8 Literatur 422**

4

Chlor, Alkalien und anorganische Chlorverbindungen*Klaus Blum, Peter Schmittinger*

- 1 Industrielle Herstellung von Chlor und Alkalihydroxid 430**
 - 1.1 Einleitung 430

- 2 Soleaufbereitung 433**
 - 2.1 Vorreinigung von Steinsalz für Elektrolysezwecke 433
 - 2.1.1 Elektrosortierverfahren der Wacker-Chemie GmbH, Stetten 434
 - 2.1.2 Schwerflüssigkeitsprozess der Südsalz AG, Heilbronn 435
 - 2.1.3 Meersalz 435
 - 2.1.4 Siedesalz 435
 - 2.1.5 Salzkosten 436
 - 2.2 Herstellung der Rohsole 436
 - 2.2.1 Soleaufkonzentrierung 438
 - 2.2.2 Entfernung der gelösten Verunreinigungen 438
 - 2.2.2.1 Kationen 438
 - 2.2.2.2 Anionen 439
 - 2.3 Rohsolereinigung 442
 - 2.4 Solefeinreinigung 443
 - 2.5 Dünnsol-Entchlorung und Hypochlorit-Zerstörung 443
 - 2.6 Chlorat-Zerstörung 445

- 3 Chlor-Alkali-Elektrolyse 445**
 - 3.1 Membranverfahren 446
 - 3.1.0.1 Energiebedarf 447
 - 3.1.0.2 Stromversorgung in großtechnischen Elektrolyse-Anlagen 452
 - 3.1.0.3 Zellenanordnung bei der Membranelektrolyse 454
 - 3.1.1 Membran 456
 - 3.1.1.1 Ermittlung des günstigsten Ersatzzeitpunktes für Membranen 464
 - 3.1.1.2 Elektroden für die Membranelektrolyse 469
 - 3.1.1.3 Anoden 469
 - 3.1.1.4 Kathoden 471
 - 3.1.2 Kommerzielle Elektrolyseure 471
 - 3.1.3 Membranelektrolyse mit Sauerstoff-Verzehrkatoden 479

- 3.2 Amalgamverfahren 481
 - 3.2.1 Prinzip des Verfahrens 481
 - 3.2.2 Technik des Amalgamverfahrens 482
 - 3.2.2.1 Kommerzielle Amalgamzellen 484
 - 3.2.2.2 Alternative Amalgamfolgeprodukte 485
 - 3.2.3 Toxikologie und Umweltschutz 489
 - 3.2.3.1 Quecksilber in den Produkten 490
 - 3.2.3.2 Quecksilber im Abwasser 491
 - 3.2.3.3 Prozessabgase 491
 - 3.2.3.4 Zellenaalabluft 491
 - 3.2.3.5 Feste Rückstände 492
 - 3.2.4 Zukunft des Amalgamverfahrens 492
- 3.3 Diaphragmaverfahren 493
 - 3.3.1 Prinzip des Verfahrens 493
 - 3.3.2 Technik des Diaphragmaverfahrens 495
 - 3.3.3 Zukunft des Diaphragmaverfahrens 499
- 3.4 Vergleich der Elektrolyseverfahren 500
 - 3.4.1 Umrüstung bestehender Anlagen auf das Membranverfahren 502

4 **Produkte der Chlor-Alkali-Elektrolyse** 502

- 4.1 Chlor 502
 - 4.1.1 Eigenschaften des Chlors 503
 - 4.1.2 Reinigung von technischem Chlorgas 504
- 4.2 Natronlauge 511
- 4.3 Wasserstoff 512

5 **Andere Chlorsynthesen und Chlorverbund-Systeme** 512

- 5.1 Elektrolyseverfahren 514
 - 5.1.1 Salzsäure-Elektrolyse 514
- 5.2 Chemische Verfahren zur Chlorerzeugung 516
- 5.3 Sonstige Elektrolyseprozesse 517
 - 5.3.1 Natriumchlorid- und Lithiumchlorid-Schmelzflusselektrolyse 517
 - 5.3.2 Magnesiumchlorid-Schmelzflusselektrolyse 519

6 **Anorganische Verbindungen des Chlors** 521

- 6.1 Chlorwasserstoff und Salzsäure 521
 - 6.1.1 Chlorwasserstoffsynthese 521
 - 6.1.1.1 Verbrennung von Wasserstoff mit Chlor 521
 - 6.1.1.2 Verbrennung von Methan mit Chlor 523
 - 6.1.1.3 Erzeugung von Salzsäure und Natronlauge durch Elektrodialyse 524
- 6.2 Sauerstoffverbindungen des Chlors 525
 - 6.2.1 Hypochlorit, Bleichlaugen 525
 - 6.2.2 Chlorite 528
 - 6.2.3 Natriumchlorat und Chlordioxid 529
 - 6.2.3.1 Prinzip des Verfahrens 530

6.2.3.2	Technik der Chloratherstellung	531
6.2.4	Perchlorsäure und Perchlorate	535
6.3	Eisenchloride	537
6.4	Phosgen	538
7	Literatur	538

5

Natriumchlorid und Alkalicarbonate

Andreas Leckzik (1), Franz Götzfried (1), Leon Ninane (2)

- 1 Natriumchlorid 547**
 - 1.1 Geschichte] 547
 - 1.2 Vorkommen 548
 - 1.3 Eigenschaften 549
 - 1.4 Produktion 549
 - 1.4.1 Steinsalz 549
 - 1.4.1.1 Bergmännische Gewinnung 549
 - 1.4.1.2 Aufbereitung 551
 - 1.4.2 Sole 553
 - 1.4.2.1 Bergmännische Gewinnung 553
 - 1.4.2.2 Kontrollierte Bohrlochsolung 554
 - 1.4.2.3 Kavernennutzung 554
 - 1.4.2.4 Solereinigung 555
 - 1.4.3 Siedesalz 555
 - 1.4.3.1 Verdampfungsverfahren 555
 - 1.4.3.2 Bewertung 557
 - 1.4.4 Meersalz 560
 - 1.4.4.1 Gewinnung aus Meerwasser 561
 - 1.4.4.2 Gewinnung aus Salzseen 562
 - 1.4.4.3 Meerwasserentsalzung 562
 - 1.4.5 Weitere Prozessschritte 563
 - 1.4.5.1 Entwässern, Trocknen, Kühlen 563
 - 1.4.5.2 Mechanische Kornvergrößerung 563
 - 1.4.5.3 Klassierung 564
 - 1.4.5.4 Konditionieren und Verpacken 564
 - 1.5 Anwendung und wirtschaftliche Bedeutung 565
- 2 Natriumcarbonat (Soda) 568**
 - 2.1 Einführung 568
 - 2.2 Geschichte 568
 - 2.3 Eigenschaften 569
 - 2.4 Herstellungsverfahren 570

- 2.4.1 Ammoniumsoda-Verfahren nach Solvay 570
 - 2.4.1.1 Beschreibung 570
 - 2.4.1.2 Theoretische Grundlagen und Darstellung 571
 - 2.4.1.3 Technologie 573
 - 2.4.1.4 Ausgangsstoffe 581
 - 2.4.1.5 Energie 582
 - 2.4.1.6 Emissionen 582
- 2.4.2 Herstellung aus natürlichem Carbonat 585
 - 2.4.2.1 Carbonatlagerstätten 585
 - 2.4.2.2 Herstellung aus Trona 585
 - 2.4.2.3 Herstellung aus Nahcolit 586
 - 2.4.2.4 Gewinnung aus Sodaseen 587
- 2.5 Weitere Verfahren 587
 - 2.5.1 Leblanc-Verfahren 587
 - 2.5.2 Modifiziertes Solvay-Verfahren 587
 - 2.5.2.1 Herstellung von Ammoniumchlorid in geringerer Menge als Natriumcarbonat 588
 - 2.5.2.2 Äquimolare Herstellung von NaHCO_3 und NH_4Cl 588
 - 2.5.3 Verwendung von Ätznatron 588
 - 2.5.4 Sonstige vorgeschlagene Verfahren 589
 - 2.5.4.1 Nephelin-Verfahren 589
 - 2.5.4.2 Verfahren mit Verwertung von HCl 589
 - 2.5.4.3 Aminverfahren 589
- 2.6 Endprodukte 590
 - 2.6.1 Technische Endprodukte 590
 - 2.6.2 Besondere Modifikationen 591
- 2.7 Lagerung und Transport 592
- 2.8 Verwendung 592
- 2.9 Toxikologie 593
- 2.10 Wirtschaftliche Aspekte 593
- 2.11 Natriumhydrogencarbonat 594
 - 2.11.1 Eigenschaften 594
 - 2.11.2 Herstellung 594
 - 2.11.3 Verwendung und Qualitäten 596

3 Literatur 596

6

Anorganische Verbindungen des Fluors

Albrecht Marhold, Jens Peter Joschek

- 1 Wirtschaftliche Bedeutung anorganischer Fluorverbindungen 602**
 - 1.1 Industrielle Bedeutung 602
 - 1.2 Produktionsumfang 602
 - 1.3 Rohstoffe 603
 - 1.3.1 Calciumfluorid 603
 - 1.3.1.1 Vorkommen und Produktion 603
 - 1.3.1.2 Verwendung 605
 - 1.3.1.3 Toxikologie 606
 - 1.3.2 Fluor-Silicium-Verbindungen 606

- 2 Fluorwasserstoffsäure 608**
 - 2.1 Verwendung 608
 - 2.2 Herstellverfahren 611
 - 2.2.1 Flussspatprozesse 612
 - 2.2.2 Prozesse basierend auf Hexafluorokieselsäure 614
 - 2.3 HF-Trialkylamin-Komplexe 615
 - 2.4 Eigenschaften 616
 - 2.4.1 Physikalische Eigenschaften 616
 - 2.4.2 Chemische Eigenschaften 616
 - 2.5 Lagerung und Transport 616
 - 2.6 Toxikologie 617

- 3 Salze der Fluorwasserstoffsäure 618**
 - 3.1 Kaliumfluorid 619
 - 3.2 Natriumfluorid 620
 - 3.3 Ammoniumfluorid 620
 - 3.4 Cobaltfluoride 621
 - 3.5 Lithiumfluorid 621
 - 3.6 Magnesiumfluorid 622
 - 3.7 Nickelfluorid 622
 - 3.8 Wolframhexafluorid 622

- 4 Aluminiumfluoride 623**
 - 4.1 Verwendungen 623
 - 4.2 Herstellverfahren 624
 - 4.2.1 Aluminiumtrifluorid, AlF_3 624
 - 4.2.1.1 Herstellung aus Flusssäure oder HF 624
 - 4.2.1.2 Aus Fluor-Silicium-Verbindungen 624
 - 4.2.1.3 Wiedergewinnung des Fluors während der Aluminiumproduktion 626
 - 4.2.2 Herstellung von Kryolith 627
 - 4.2.2.1 HF-Prozesse 627
 - 4.2.2.2 Hexafluorokieselsäureprozess 628
 - 4.2.2.3 Wiedergewinnung von Fluor während der Aluminiumproduktion 629
 - 4.3 Eigenschaften 630
 - 4.3.1 Aluminiumfluorid 630
 - 4.3.2 Fluoroaluminat 630
 - 4.3.3 Kryolith, $\text{AlF}_3 \cdot 3 \text{NaF}$ 630
 - 4.4 Toxikologie 631

- 5 Bortrifluorid und Fluorborate 631**
 - 5.1 Verwendung 631
 - 5.2 Herstellung 631
 - 5.3 Eigenschaften 632

- 6 Interhalogenfluoride 632**
 - 6.1 Verwendungen und chemische Eigenschaften 633
 - 6.2 Herstellung 633
 - 6.3 Physikalische Eigenschaften und Toxikologie 634

- 7 Fluorsulfonsäure 634**
 - 7.1 Verwendung 634
 - 7.2 Herstellung 635

- 8 Fluor 636**
 - 8.1 Verwendung und wirtschaftliche Aspekte 637
 - 8.2 Vorkommen 638
 - 8.3 Industrielle Produktion 638
 - 8.4 Chemische Eigenschaften 640
 - 8.5 Physikalische Eigenschaften 641
 - 8.6 Handhabung, Lagerung und Transport 642
 - 8.7 Umweltschutz und Entsorgung des Fluors 642

- 9 Weitere anorganische Fluorverbindungen 642**
 - 9.1 Schwefelfluoride 642
 - 9.1.1 Schwefelhexafluorid 643
 - 9.1.2 Schwefeltetrafluorid 644
 - 9.2 Stickstofftrifluorid 644

9.3	Sauerstoff-Fluor-Verbindungen	644
9.4	Phosphor-Fluor-Verbindungen	645
9.5	Edelgasfluoride	645
9.6	Graphitfluoride	646
10	Fluor-Silicium-Verbindungen	646
10.1	Siliciumtetrafluorid	646
10.2	Hexafluorokieselsäure	647
10.3	Fluorosilicate	648
11	Literatur	648

7

Borverbindungen

Birgit Bertsch-Frank (2, 5), Cordula Terbrack (1, 3, 4)

- 1 **Einleitung, Geschichtliches** 658
- 2 **Bor-Sauerstoff-Verbindungen** 658
 - 2.1 Wirtschaftliches 660
 - 2.2 Herstellprozesse in der Übersicht 661
 - 2.3 Borsäure und Bortrioxid 662
 - 2.4 Natriumtetraborate 663
 - 2.5 Weitere Borate 664
 - 2.6 Anwendung 664
- 3 **Sonstige Borverbindungen** 665
 - 3.1 Bornitrid, Borcarbid und Metallboride 665
 - 3.2 Borhalogenide 667
 - 3.3 Borane 669
 - 3.3.1 Borane 669
 - 3.3.2 Boranate 669
 - 3.4 Borsäureester 670
- 4 **Toxikologie** 671
- 5 **Ausblick** 672
- 6 **Literatur** 673

8

Peroxoverbindungen

Gustaaf Goor, Eberhard Hägel, Sylvia Jacobi, Wolfgang Leonhardt, Werner Zeiss, Klaus Zimmermann

- 1 **Einleitung** 677
- 2 **Geschichte** 679
- 3 **Verbindungsklassen** 682
 - 3.1 Wasserstoffperoxid 682
 - 3.1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften 682
 - 3.1.2 Herstellung 685
 - 3.1.2.1 Anthrachinonverfahren 685
 - 3.1.2.2 Herstellung durch Alkoholoxidation 699
 - 3.1.2.3 Elektrochemische Herstellung 702
 - 3.1.2.4 Direktsynthese aus Wasserstoff und Sauerstoff 703
 - 3.1.3 Anwendung und Transport 704
 - 3.1.4 Sicherheit und Toxikologie 706
 - 3.2 Wasserstoffperoxid-Addukte 709
 - 3.2.1 Natriumcarbonatperoxohydrat 709
 - 3.2.1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften 709
 - 3.2.1.2 Herstellung 710
 - 3.2.1.3 Anwendung 712
 - 3.2.1.4 Sicherheit und Toxikologie 713
 - 3.2.2 Harnstoffperoxohydrat 714
 - 3.3 Anorganische Peroxoverbindungen 715
 - 3.3.1 Peroxoborate 715
 - 3.3.1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften 715
 - 3.3.1.2 Herstellung 717
 - 3.3.1.3 Anwendung 719
 - 3.3.1.4 Sicherheit, Toxikologie und Handhabung 720
 - 3.3.2 Peroxomonoschwefelsäure (Caro'sche Säure) und ihre Salze 722
 - 3.3.2.1 Physikalische und chemische Eigenschaften 722
 - 3.3.2.2 Herstellung 724
 - 3.3.2.3 Anwendung 724

- 3.3.2.4 Sicherheit und Toxikologie 725
- 3.3.3 Peroxodischwefelsäure und ihre Salze 726
 - 3.3.3.1 Physikalische und chemische Eigenschaften 726
 - 3.3.3.2 Herstellung 727
 - 3.3.3.3 Anwendung 730
 - 3.3.3.4 Sicherheit, Toxikologie und Handhabung 731
- 3.3.4 Peroxophosphorsäure und ihre Salze 732
- 3.4 Anorganische Peroxide 734
 - 3.4.1 Physikalische und chemische Eigenschaften 734
 - 3.4.2 Herstellung 736
 - 3.4.3 Anwendung 738
 - 3.4.4 Sicherheit und Toxikologie 738
- 3.5 Organische Peroxoverbindungen 738
 - 3.5.1 Peroxycarbonsäuren 738
 - 3.5.1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften 738
 - 3.5.1.2 Herstellung 741
 - 3.5.1.3 Anwendung 742
 - 3.5.1.4 Sicherheit und Toxikologie 743
 - 3.5.2 Organische Peroxide 745
 - 3.5.2.1 Physikalische und chemische Eigenschaften 745
 - 3.5.2.2 Herstellung 747
 - 3.5.2.3 Anwendungen 751
 - 3.5.2.4 Sicherheit, Toxikologie und Handhabung 753

4 **Literatur** 758

9

Carbide und Kalkstickstoff

*Aus der 4. Auflage von Friedrich Wilhelm Dorn, Herwig Höger, Klaus Liethschmidt,
Georg Strauß.*

Neu bearbeitet von Klaus Englmaier

- 1 Calciumcarbid 769**
 - 1.1 Historischer und wirtschaftlicher Überblick 769
 - 1.2 Grundlagen des Herstellverfahrens 770
 - 1.2.1 Eigenschaften des Calciumcarbids 770
 - 1.2.2 Reaktionsbedingungen 772
 - 1.2.3 Nebenreaktionen 773
 - 1.3 Herstellung von Calciumcarbid 773
 - 1.3.1 Rohstoffe und deren Aufbereitung 773
 - 1.3.1.1 Schwarzmaterial (Koks und Kohle) 774
 - 1.3.1.2 Weißmaterial (Kalk) 775
 - 1.3.2 Elektrothermisches Verfahren 776
 - 1.3.2.1 Elektroofen 776
 - 1.3.2.2 Möllerbeschickung 778
 - 1.3.2.3 Hohlelektrodenbeschickung 778
 - 1.3.2.4 Elektroden 779
 - 1.3.2.5 Elektrische Ausrüstung 780
 - 1.3.2.6 Gasanlage 780
 - 1.3.2.7 Carbidabstich und Kühlung 781
 - 1.3.2.8 Carbidofenbetrieb 781
 - 1.3.2.9 Stoff- und Energieaufwand 782
 - 1.3.3 Carbothermisches Verfahren 783
 - 1.4 Produkte 783
 - 1.4.1 Aufbereitung und Versand des Calciumcarbids 783
 - 1.4.2 Qualitätsanforderungen 784
 - 1.4.3 Umweltfragen 784
 - 1.5 Verwendung 784
- 2 Kalkstickstoff 785**
 - 2.1 Historischer und wirtschaftlicher Überblick 785
 - 2.2 Grundlagen des Herstellverfahrens 786

- 2.2.1 Eigenschaften des Kalkstickstoffs 786
- 2.2.2 Reaktionsbedingungen 787
- 2.3 Herstellung von Kalkstickstoff 787
 - 2.3.1 Rohstoffe 787
 - 2.3.2 Herstellverfahren 788
 - 2.3.2.1 Trostberger Drehofen-Verfahren 788
 - 2.3.2.2 Frank-Caro-Verfahren (Setzofen-Verfahren) 789
 - 2.3.2.3 Sonstige Verfahren 790
 - 2.4 Nachbehandlung des Kalkstickstoffs 791
 - 2.4.1 Zerkleinern 791
 - 2.4.2 Granulieren 791
 - 2.4.3 Lagerung und Verpackung 791
 - 2.5 Verwendung 792
 - 2.5.1 Landwirtschaft 792
 - 2.5.2 Sonstige Verwendung 792
 - 2.5.3 Qualitätskontrolle 793
 - 2.5.4 Sicherheits- und Umweltfragen 793
 - 2.6 Ausblick 793

- 3 Siliciumcarbid 794**
 - 3.1 Allgemeiner und wirtschaftlicher Überblick 794
 - 3.2 Eigenschaften 794
 - 3.3 Reaktionsbedingungen 795
 - 3.4 Rohstoffe 795
 - 3.5 Herstellung im Elektroofen 796
 - 3.5.1 Acheson-Verfahren 796
 - 3.5.2 ESK-Verfahren 797
 - 3.6 Aufbereitung 798
 - 3.7 Verwendung 798

- 4 Borcarbid 799**

- 5 Literatur 800**

10

Siliciumverbindungen

Dieter Kerner, Norbert Schall, Wolfgang Schmidt, Ralf Schmoll, Jost Schürtz

- 1 Natürliche Silicate 806**
 - 1.1 Einleitung 806
 - 1.2 Einteilung 806
 - 1.3 Inselsilicate 807
 - 1.3.1 Olivin, Forsterit 807
 - 1.3.2 Zirkon 807
 - 1.4 Ringsilicate 807
 - 1.4.1 Beryll 807
 - 1.5 Ketten- und Bandsilicate 808
 - 1.5.1 Wollastonit 808
 - 1.6 Schichtsilicate 808
 - 1.6.1 Pyrophyllit 808
 - 1.6.2 Talk 809
 - 1.6.3 Glimmer-Gruppe 810
 - 1.6.4 Illite 810
 - 1.6.5 Montmorillonit-Gruppe 811
 - 1.6.5.1 Alkalische Aktivierung 811
 - 1.6.5.2 Säureaktivierung 812
 - 1.6.5.3 Organophile Bentonite 813
 - 1.6.6 Vermiculit 815
 - 1.6.7 Kaolin 815
 - 1.6.8 Asbest 817
 - 1.6.9 Attapulgit (Palygorskit), Sepiolith 818
 - 1.7 Tectosilicate 819
 - 1.7.1 Feldspatgruppe 819
 - 1.7.2 Natürliche Zeolithe 820
- 2 Wasserglas und synthetische Zeolithe 820**
 - 2.1 Lösliche Silicate (Wassergläser) 820
 - 2.1.1 Chemische Zusammensetzung 820
 - 2.1.2 Historisches und wirtschaftliche Bedeutung 822
 - 2.1.3 Eigenschaften der Silicate 823

- 2.1.3.1 Schmelzdiagramme der Systeme $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ und $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 823
- 2.1.3.2 Zusammensetzung und Eigenschaften der Silicat-Lösungen 825
- 2.1.3.3 Analysenverfahren 827
- 2.1.4 Herstellverfahren 827
 - 2.1.4.1 Allgemeines 827
 - 2.1.4.2 Schmelzprozesse mit nachfolgender Lösung unter Druck 828
 - 2.1.4.3 Sinterverfahren 831
 - 2.1.4.4 Hydrothermale Verfahren 832
 - 2.1.4.5 Spezialwassergläser 832
- 2.1.5 Verwendung 832
- 2.1.6 Kennzeichnung, Transport, Umwelt 833
- 2.2 Synthetische Zeolithe 834
 - 2.2.1 Erforschung und wirtschaftliche Bedeutung von Zeolithen 834
 - 2.2.2 Aufbau von Zeolithen 836
 - 2.2.3 Eigenschaften von Zeolithen 839
 - 2.2.4 Anwendungen synthetischer Zeolithe 842
 - 2.2.5 Herstellung von Zeolithen 844
- 2.3 Synthetische Silicate 849

- 3 Synthetische amorphe Silicas 850**
 - 3.1 Einleitung, Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung 850
 - 3.2 Herstellverfahren 853
 - 3.2.1 Pyrogene Silicas 853
 - 3.2.2 Lichtbogenverfahren 855
 - 3.2.3 Plasmaverfahren 856
 - 3.2.4 Silicas nach Nassverfahren 856
 - 3.2.4.1 Fällungssilica (gefällte Silica) 858
 - 3.2.4.2 Silicagele 860
 - 3.2.4.3 Silicasole 862
 - 3.2.5 Nachbehandlung von Silicas 863
 - 3.3 Versand und Handhabung 865
 - 3.4 Eigenschaften 865
 - 3.5 Anwendungen 870
 - 3.6 Toxikologie und Arbeitshygiene 872

- 4 Weitere Siliciumverbindungen 874**
 - 4.1 Halogensilane 874
 - 4.1.1 Physikalisch-chemische Grundlagen 874
 - 4.1.2 Herstellverfahren 875
 - 4.1.3 Anwendung 877
 - 4.2 Monosilan 877
 - 4.3 Organofunktionelle Silane 878
 - 4.3.1 Strukturen, Eigenschaften und Anwendungen 878
 - 4.3.2 Herstellung 880
 - 4.4 Silicaester 882

4.4.1	Strukturen, Eigenschaften und Anwendungen	882
4.4.2	Herstellung	883
5	Literatur	884

Kohlenstoffprodukte

Gerd Collin (1–6), Wilhelm Frohs (2), Jürgen Behnisch (3), Gerd-Peter Blümer (4), Peter K. Bachmann (5), Peter Scharff (6)

- 1 Definitionen, Historisches und Wirtschaftliches 895**
 - 1.1 Vorkommen und Modifikationen des elementaren Kohlenstoffs 895
 - 1.2 Historisches 895
 - 1.3 Wirtschaftliches 897

- 2 Formprodukte aus graphitischem Kohlenstoff 898**
 - 2.1 Historisches und Wirtschaftliches 898
 - 2.1.1 Historisches 898
 - 2.1.2 Wirtschaftliches 899
 - 2.2 Definitionen und Grundlagen 900
 - 2.3 Herstellung von polygranularen Kohlenstoff- und Graphitprodukten 904
 - 2.3.1 Rohstoffe 904
 - 2.3.1.1 Feststoffe 904
 - 2.3.1.2 Binder 907
 - 2.3.2 Zerkleinern, Klassieren 908
 - 2.3.3 Mischen 909
 - 2.3.4 Formen 910
 - 2.3.5 Carbonisieren 914
 - 2.3.6 Graphitieren 919
 - 2.3.7 Reinigen 924
 - 2.3.8 Imprägnieren 924
 - 2.3.9 Bearbeiten 926
 - 2.4 Verwendung von Kohlenstoff- und Graphitprodukten 927
 - 2.4.1 Elektroden für elektrothermische und elektrochemische Verfahren 927
 - 2.4.1.1 Elektroden für Lichtbogenöfen zur Stahlerzeugung 927
 - 2.4.1.2 Elektroden für Lichtbogenwiderstandsöfen 928
 - 2.4.1.3 Heizleiter für Widerstandsöfen 929
 - 2.4.1.4 Elektroden für wässrige Elektrolysen 929
 - 2.4.1.5 Elektroden für Schmelzflusselektrolysen 929

- 2.4.2 Auskleidungen und andere Anwendungen in der Metallurgie 930
 - 2.4.2.1 Ofenzustellungen 930
 - 2.4.2.2 Gießformen 931
- 2.4.3 Produkte für Chemieapparate 931
- 2.4.4 Produkte für die Elektrotechnik und Teile für Maschinen 932
 - 2.4.4.1 Kontakte und Spezialanwendungen 932
 - 2.4.4.2 Teile und Schmiermittel für Maschinen 933
- 2.4.5 Reaktorgraphit 935
- 2.5 Monogranularer Kohlenstoff und Graphit 935
 - 2.5.1 Kohlenstofffasern 935
 - 2.5.2 Glaskohlenstoff 939
 - 2.5.3 Pyrokohlenstoff und Pyrographit 939
 - 2.5.4 Graphitfolien 940

- 3 Industrieruß 941**
 - 3.1 Definition und Historisches 941
 - 3.2 Wirtschaftliches 942
 - 3.3 Eigenschaften 943
 - 3.3.1 Physikalische Eigenschaften 943
 - 3.3.1.1 Morphologie 943
 - 3.3.1.2 Spezifische Oberfläche 944
 - 3.3.1.3 Adsorptionsvermögen 944
 - 3.3.1.4 Elektrische Leitfähigkeit 945
 - 3.3.1.5 Lichtabsorption 945
 - 3.3.2 Chemische Eigenschaften 945
 - 3.3.3 Prüfung und Analyse 946
 - 3.3.3.1 Oberflächenbestimmung 946
 - 3.3.3.2 Strukturbestimmung 947
 - 3.3.3.3 Coloristische Messungen 948
 - 3.3.3.4 Gummitechnische Prüfung 948
 - 3.3.3.5 Chemische Analyse 948
 - 3.3.3.6 Beschaffenheit und Handling 949
 - 3.4 Herstellverfahren 949
 - 3.4.1 Rohstoffe 949
 - 3.4.2 Furnaceruß-Verfahren 950
 - 3.4.3 Gasruß-Verfahren 954
 - 3.4.4 Flammruß-Verfahren 955
 - 3.4.5 Thermalruß-Verfahren 955
 - 3.4.6 Acetylenruß-Verfahren 956
 - 3.5 Aufarbeitung 957
 - 3.5.1 Verdichtung und Verperlung 957
 - 3.5.2 Oxidative Nachbehandlung 958
 - 3.6 Lagerung und Versand 959
 - 3.7 Verwendung 959
 - 3.8 Toxikologie 961

- 4 Aktivkohle 962**
 - 4.1 Einleitung 962
 - 4.2 Geschichte 963
 - 4.3 Wirtschaftliches 964
 - 4.4 Rohstoffe 964
 - 4.5 Aufbereitung der Rohstoffe 965
 - 4.6 Aktivierung der Rohstoffe 967
 - 4.6.1 Chemische Aktivierung 967
 - 4.6.2 Gasaktivierung (Physikalische Aktivierung) 969
 - 4.6.3 Technologie der Aktivierung 970
 - 4.6.4 Nachbehandlung 974
 - 4.7 Imprägnierung von Aktivkohlen 975
 - 4.8 Eigenschaften von Aktivkohlen 975
 - 4.8.1 Allgemeine Eigenschaften 975
 - 4.8.2 Physikalische Eigenschaften von Aktivkohle 977
 - 4.8.3 Chemische Eigenschaften von Aktivkohle 977
 - 4.8.4 Adsorptionseigenschaften von Aktivkohle 978
 - 4.8.5 Technische Typenklassifizierung von Aktivkohlen 979
 - 4.8.6 Testmethoden für Aktivkohlen 980
 - 4.9 Anwendungsverfahren 981
 - 4.9.1 Verfahrensübersicht 981
 - 4.9.2 Einrührverfahren 981
 - 4.9.3 Festbettverfahren 981
 - 4.9.4 Bewegtbettverfahren 983
 - 4.10 Anwendungsgebiete 985
 - 4.10.1 Allgemeines 985
 - 4.10.2 Entfärbung 985
 - 4.10.3 Wasserreinigung 986
 - 4.10.4 Weitere Anwendungen in der Flüssigphase 987
 - 4.10.5 Luft- und Gasreinigung 988
 - 4.10.6 Gastrennung 990
 - 4.11 Regenerierung und Reaktivierung 990

- 5 Diamant 991**
 - 5.1 Struktur, Eigenschaften und Anwendungsfelder 991
 - 5.2 Naturdiamanten 993
 - 5.3 Synthetische Diamanten 995
 - 5.3.1 Hochdruck-Hochtemperatur-(HPHT)-Synthese von Diamant 995
 - 5.3.2 Die Entwicklung von Diamant-Niederdrucksynthesen 999
 - 5.3.3 Grundlagen, allgemeine Konzepte und Verfahren der Diamantabscheidung 1001
 - 5.4 Ausgewählte Anwendungsbeispiele 1012
 - 5.5 Zusammenfassung und Ausblick 1017

- 6 Fullerene und Kohlenstoff-Nanoröhren 1018**
 - 6.1 Fullerene 1018
 - 6.1.1 Entstehung und Entdeckung 1018
 - 6.1.2 Herstellung 1018
 - 6.1.2.1 Krätschmer-Huffman-Verfahren 1018
 - 6.1.2.2 Lichtbogen-Verdampfung von Graphit] 1019
 - 6.1.2.3 Induktionsverfahren 1020
 - 6.1.2.4 Laser-Verdampfung von Kohlenstoff 1020
 - 6.1.2.5 Solarenergie-Verdampfung von Kohlenstoff 1020
 - 6.1.2.6 Rußende Flammen 1021
 - 6.1.2.7 Zusammenfassung 1021
 - 6.1.3 Isolierung 1021
 - 6.1.4 Trennung und Reinigung 1021
 - 6.1.5 Charakterisierung 1022
 - 6.1.6 Eigenschaften 1022
 - 6.1.7 Fulleren-Derivate 1023
 - 6.1.7.1 Endohedrale Fullerene 1023
 - 6.1.7.2 Exohedrale Verbindungen – Kovalente Bindung 1024
 - 6.1.7.3 Exohedrale Verbindungen – Intercalationsverbindungen 1024
 - 6.1.7.4 Exohedrale Verbindungen – Polymere 1025
 - 6.1.7.5 Heterofullerene 1025
 - 6.2 Kohlenstoff-Nanoröhren 1025
 - 6.2.1 Herstellung 1027
 - 6.2.1.1 Katalytische Zersetzung von Kohlenwasserstoffen 1027
 - 6.2.1.2 Gleichstrom- oder Wechselstromlichtbogen zwischen Graphitelektroden 1027
 - 6.2.1.3 Laser-Verdampfung von Kohlenstoff 1027
 - 6.2.1.4 Solarenergie-Verdampfung von Kohlenstoff 1028
 - 6.2.1.5 Zusammenfassung 1028
 - 6.2.2 Reinigung 1029
 - 6.2.3 Charakterisierung 1029
 - 6.2.4 Eigenschaften 1030
 - 6.2.5 Anwendung 1030
- 7 Literatur 1031**

12

Wasser

Jutta Jahnel, Markus Ziegmann, Fritz H. Frimmel

- 1 Wasser, der besondere Stoff 1043**
 - 1.1 Das Molekül 1043
 - 1.2 Physikalische Eigenschaften 1043
 - 1.3 Wasser als Lösemittel 1046
 - 1.4 Wasser als Lebensgrundlage 1048

- 2 Globale Wassermengen und natürlicher Wasserkreislauf 1049**
 - 2.1 Gesamtbilanz 1049
 - 2.2 Der natürliche Wasserkreislauf 1049
 - 2.3 Wasserarten 1050

- 3 Wassernutzung und Wasserqualität 1053**
 - 3.1 Wasserbedarf 1053
 - 3.2 Trinkwasser 1055
 - 3.3 Mineralwasser, Heilwasser, Tafelwasser 1057
 - 3.4 Brauchwasser 1058
 - 3.5 Abwasser 1060

- 4 Gesetze, Verordnungen, Richtlinien 1060**
 - 4.1 Wasserhaushaltsgesetz 1060
 - 4.2 Wasserrahmenrichtlinie 1061
 - 4.3 Trinkwasser-Verordnung 1061
 - 4.4 Abwasserabgabengesetz 1062
 - 4.5 Technische Regeln 1062

- 5 Wassererschließung und Wasserverteilung 1063**
 - 5.1 Niederschläge 1063
 - 5.2 Grundwasser 1064
 - 5.3 Oberflächenwasser, Uferfiltration 1065
 - 5.4 Verteilungsnetze 1067

- 6 Wassertechnik 1068**
 - 6.1 Stofftrennung 1069
 - 6.1.1 Entfernung von Feststoffen 1069
 - 6.1.2 Entfernen gelöster Stoffe 1078
 - 6.1.3 Einbringen und Entfernen von Gasen 1083
 - 6.2 Reaktionen 1085
 - 6.2.1 pH-Wert-Korrektur 1085
 - 6.2.2 Oxidationen 1087
 - 6.2.3 Bioabbau 1090
 - 6.3 Aufbereitungskonzepte in der Praxis 1090

- 7 Konzepte der Wasserbewirtschaftung 1093**
 - 7.1 Produktionsintegrierter Gewässerschutz 1093
 - 7.2 Produktintegrierter Gewässerschutz 1094
 - 7.3 Konsumintegrierter Gewässerschutz 1094
 - 7.4 Kreislaufführung 1095
 - 7.5 Globalisierung des Wassermarkts 1095

- 8 Literatur 1095**