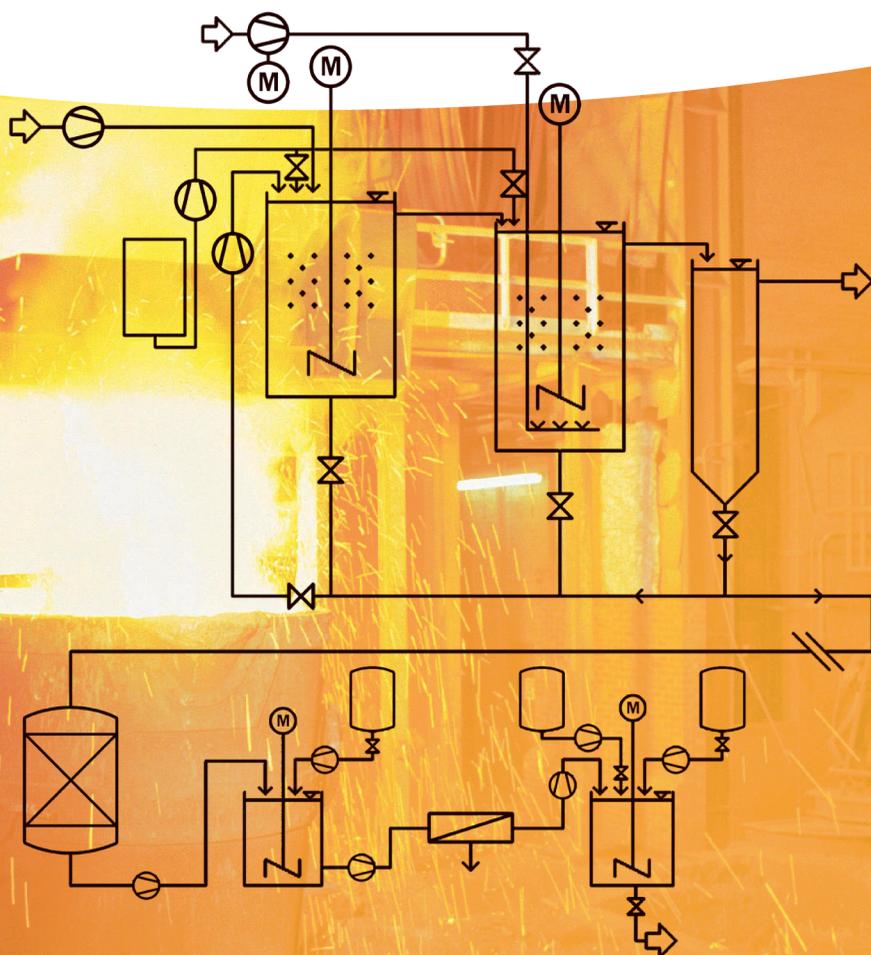


M. Bertau, A. Müller, P. Fröhlich und M. Katzberg

# Industrielle Anorganische Chemie

Mit einem Geleitwort von K. H. Büchel,  
H.-H. Moretto und P. Woditsch

Vierte, vollständig überarbeitete und  
aktualisierte Auflage





*Martin Bertau, Armin Müller,  
Peter Fröhlich und Michael Katzberg*

**Industrielle Anorganische Chemie**



***Beachten Sie bitte auch weitere interessante Titel zu diesem Thema***

Arni, A.

### **Grundkurs Chemie I und II**

Allgemeine, Anorganische und Organische Chemie für Fachunterricht und Selbststudium

2010

978-3-527-33068-3

Behr, A.

### **Angewandte homogene Katalyse**

2008

978-3-527-31666-3

Böhme, U.

### **Chemie für Ingenieure für Dummies**

2011

978-3-527-70682-2

Arpe, H.-J.

### **Industrielle Organische Chemie**

Bedeutende Vor- und Zwischenprodukte

2007

978-3-527-31540-6

Böhme, U.

### **Anorganische Chemie für Dummies**

2010

978-3-527-70502-3

Baerns, M., Behr, A., Brehm, A., Gmehling, J., Hofmann, H., Onken, U., Renken, A.

### **Technische Chemie**

2006

978-3-527-31000-5

Nesper, R.

### **Online-Praktikum Anorganische Chemie**

2008

978-3-527-32690-7



*Martin Bertau, Armin Müller, Peter Fröhlich und  
Michael Katzberg*

## **Industrielle Anorganische Chemie**

Mit einem Geleitwort von K.H. Büchel, H.-H. Moretto  
und P. Woditsch

Vierte, vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage

**WILEY-VCH**  
Verlag GmbH & Co. KGaA

#### **Autoren**

Prof. Dr. Martin Bertau  
Inst. f. Technische Chemie  
TU Bergakademie Freiberg  
Leipziger Str. 29  
09599 Freiberg

Prof. Dr.rer.nat. Armin Müller  
TU Bergakademie Freiberg  
Institut für Technische Chemie  
Leipziger Str. 29  
09599 Freiberg

Dipl.-Chem. Peter Fröhlich  
TU Bergakademie Freiberg  
Institut für Technische Chemie  
Leipziger Str. 29  
09599 Freiberg

Dipl.-Chem. Michael Katzberg  
TU Bergakademie Freiberg  
Institut für Technische Chemie  
Leipziger Str. 29  
09599 Freiberg

Cover  
Abbildung des Hochofens © Digital Vision

1. Auflage 1984
2. Auflage 1986
3. Auflage 1999
4. Auflage 2013

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

#### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

© 2013 Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

**Print ISBN:** 978-3-527-33019-5

**ePDF ISBN:** 978-3-527-64959-4

**ePub ISBN:** 978-3-527-64958-7

**mobi ISBN:** 978-3-527-64957-0

**oBook ISBN:** 978-3-527-64956-3

**Satz** Reemers Publishing Services GmbH, Krefeld

**Druck und Bindung** betz-druck GmbH, Darmstadt

**Umschlaggestaltung** Formgeber, Eppelheim

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort zur 4. Auflage** XXI

**Kurzbiografien der Autoren** XXIII

**Geleitwort** XXV

<b>1</b>	<b>Anorganische Grundprodukte</b>	<b>1</b>
1.1	Wasserstoff und seine Verbindungen	1
1.1.1	Wasserstoff	1
1.1.1.1	Allgemeines	1
1.1.1.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	1
1.1.1.3	Vorkommen und Rohstoffe	3
1.1.1.4	Herstellung von Wasserstoff	3
1.1.1.5	Neue Trends zur Synthese von Wasserstoff	6
1.1.2	Wasser	8
1.1.2.1	Allgemeines	9
1.1.2.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	9
1.1.2.3	Vorkommen und Rohstoffe	10
1.1.2.4	Aufbereitung von Wasser	11
1.1.3	Wasserstoffperoxid und anorganische Peroxoverbindungen	20
1.1.3.1	Allgemeines	21
1.1.3.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	22
1.1.3.3	Wasserstoffperoxid	24
1.1.3.4	Peroxoverbindungen	28
1.2	Stickstoff und Stickstoffverbindungen	31
1.2.1	Allgemeines	32
1.2.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	33
1.2.3	Vorkommen und Rohstoffe	37
1.2.4	Stickstoffverbindungen	38
1.3	Phosphor und seine Verbindungen	50
1.3.1	Allgemeines	50
1.3.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	51

- 1.3.3 Vorkommen und Rohstoffe für Phosphor und anorganische Phosphorverbindungen 56
- 1.3.4 Herstellung von Phosphor 59
  - 1.3.4.1 Herstellung von weißem Phosphor 59
  - 1.3.4.2 Herstellung von rotem Phosphor 61
- 1.3.5 Herstellung von Phosphorverbindungen 62
  - 1.3.5.1 Phosphorsäure 62
  - 1.3.5.2 Phosphorpentoxid 71
  - 1.3.5.3 Phosphorpentasulfid 72
  - 1.3.5.4 Halogenide des Phosphors 72
  - 1.3.5.5 Säuren und Salze des Phosphors mit  $P^{5+}$  74
  - 1.3.5.6 Organische Verbindungen des Phosphors 75
- 1.4 Schwefel und Schwefelverbindungen 79
  - 1.4.1 Allgemeines 80
  - 1.4.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 80
  - 1.4.3 Vorkommen und Rohstoffe 81
  - 1.4.4 Herstellung von Schwefel 82
    - 1.4.4.1 Schwefel aus Elementarschwefelvorkommen 82
    - 1.4.4.2 Schwefel aus Schwefelwasserstoff und Schwefeldioxid 82
    - 1.4.4.3 Schwefel aus Pyrit 83
  - 1.4.5 Herstellung und Verwendung von Schwefelverbindungen 83
    - 1.4.5.1 Schwefeldioxid, 100 %ig 83
    - 1.4.5.2 Schwefeltrioxid, 100 %ig 84
    - 1.4.5.3 Schwefelsäure 85
    - 1.4.5.4 Dischwefeldichlorid 95
    - 1.4.5.5 Schwefeldichlorid 95
    - 1.4.5.6 Thionylchlorid 95
    - 1.4.5.7 Sulfurylchlorid 96
    - 1.4.5.8 Chlorsulfonsäure 96
    - 1.4.5.9 Fluorsulfonsäure 97
    - 1.4.5.10 Salze der Schwefligen Säure 97
    - 1.4.5.11 Natriumthiosulfat und Ammoniumthiosulfat 97
    - 1.4.5.12 Natriumdithionit und Natriumhydroxymethansulfinat 98
    - 1.4.5.13 Schwefelwasserstoff 99
    - 1.4.5.14 Natriumsulfid 100
    - 1.4.5.15 Natriumhydrogensulfid 100
    - 1.4.5.16 Schwefelkohlenstoff 100
- 1.5 Halogene und Halogenverbindungen 101
  - 1.5.1 Fluor und Fluorverbindungen 101
    - 1.5.1.1 Allgemeines 102
    - 1.5.1.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung von Fluor 102
    - 1.5.1.3 Vorkommen und Rohstoffe 103
    - 1.5.1.4 Herstellung von Fluor 105
    - 1.5.1.5 Herstellung und Verwendung von Fluorverbindungen 107
  - 1.5.2 Chlor und Chlorverbindungen 117

- 1.5.2.1 Allgemeines 118
- 1.5.2.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 118
- 1.5.2.3 Vorkommen und Rohstoffe 120
- 1.5.2.4 Herstellung von Chlor 120
- 1.5.2.5 Herstellung und Verwendung von Chlorverbindungen 131
- 1.5.3 Brom und Bromverbindungen 141
- 1.5.3.1 Allgemeines 142
- 1.5.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 142
- 1.5.3.3 Vorkommen und Rohstoffe 144
- 1.5.3.4 Herstellung von Brom 144
- 1.5.3.5 Herstellung von Bromverbindungen 146
- 1.5.4 Iod und Iodverbindungen 147
- 1.5.4.1 Allgemeines 147
- 1.5.4.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 148
- 1.5.4.3 Vorkommen und Rohstoffe 149
- 1.5.4.4 Herstellung von Iod 149
- 1.5.4.5 Herstellung von Iodverbindungen 150
- 1.6 Technische Gase 151
- 1.6.1 Allgemeines 151
- 1.6.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 153
- 1.6.3 Herstellung 155
- 1.6.3.1 Sauerstoff und Stickstoff 155
- 1.6.3.2 Edelgase 156
- 1.6.3.3 Kohlenstoffmonoxid 160
- 1.6.3.4 Kohlenstoffdioxid 163
  
- 2 Mineralische Dünger 171**
- 2.1 Phosphorhaltige Düngemittel 171
- 2.1.1 Wirtschaftliche Bedeutung 172
- 2.1.1.1 Gesamtphosphordünger 172
- 2.1.1.2 Superphosphat 173
- 2.1.1.3 Tripelsuperphosphat 173
- 2.1.1.4 Ammoniumphosphate 174
- 2.1.1.5 Thomasphosphate 174
- 2.1.2 Rohstoffe 174
- 2.1.3 Gewinnung der Phosphate 175
- 2.1.3.1 Schwefelsäureaufschluss zur Herstellung von Superphosphat 175
- 2.1.3.2 Phosphorsäureaufschluss 176
- 2.1.3.3 Salpetersäureaufschluss 176
- 2.1.3.4 Aufschluss durch Glühverfahren 177
- 2.1.3.5 Thomasphosphat 177
- 2.1.3.6 Ammoniumphosphate 177
- 2.1.3.7 Nitrophosphate 179
- 2.2 Stickstoffhaltige Düngemittel 180
- 2.2.1 Wirtschaftliche Bedeutung 180

- 2.2.1.1 Ammoniumsulfat 181
- 2.2.1.2 Ammoniumnitrat 182
- 2.2.1.3 Harnstoff 182
- 2.2.2 Herstellung von stickstoffhaltigen Düngemitteln 183
  - 2.2.2.1 Ammoniumsulfat 184
  - 2.2.2.2 Harnstoff 184
  - 2.2.2.3 Ammoniumnitrat 187
- 2.3 Kaliumhaltige Düngemittel 189
  - 2.3.1 Vorkommen von Kalisalzen 189
  - 2.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung von kaliumhaltigen Düngemitteln 190
  - 2.3.3 Herstellung von kaliumhaltigen Düngemitteln 191
    - 2.3.3.1 Kaliumchlorid 191
    - 2.3.3.2 Kaliumsulfat 193
    - 2.3.3.3 Kaliumnitrat 194
- 3 Metalle und ihre Verbindungen 197**
  - 3.1 Alkali- und Erdalkalimetalle und ihre Verbindungen 197
    - 3.1.1 Alkalimetalle und ihre Verbindungen 197
      - 3.1.1.1 Lithium und seine Verbindungen 198
      - 3.1.1.2 Natrium und seine Verbindungen 206
      - 3.1.1.3 Kalium und seine Verbindungen 217
      - 3.1.1.4 Rubidium und seine Verbindungen 220
      - 3.1.1.5 Caesium und seine Verbindungen 221
    - 3.1.2 Erdalkalimetalle und ihre Verbindungen 223
      - 3.1.2.1 Allgemeines 223
      - 3.1.2.2 Beryllium und seine Verbindungen 223
      - 3.1.2.3 Magnesium und seine Verbindungen 225
      - 3.1.2.4 Calcium und seine Verbindungen 230
      - 3.1.2.5 Strontium und seine Verbindungen 234
      - 3.1.2.6 Barium und seine Verbindungen 237
  - 3.2 Aluminium und seine Verbindungen 240
    - 3.2.1 Allgemeines 241
    - 3.2.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 241
      - 3.2.2.1 Aluminiummetall 241
      - 3.2.2.2 Aluminiumverbindungen 242
    - 3.2.3 Vorkommen und Rohstoffe 244
    - 3.2.4 Herstellung von Aluminium 245
      - 3.2.4.1 Recycling 246
    - 3.2.5 Herstellung von Aluminiumverbindungen 246
  - 3.3 Eisen und Stahl 248
    - 3.3.1 Allgemeines 249
    - 3.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 249
    - 3.3.3 Vorkommen und Rohstoffe 251
    - 3.3.4 Eisen, metallisch 252
      - 3.3.4.1 Hochofenprozess 253

- 3.3.5 Stahl 256
  - 3.3.5.1 Wind- und Herdfrischverfahren 256
  - 3.3.5.2 Elektroschmelzverfahren 257
  - 3.3.5.3 Edelstahl 258
- 3.3.6 Eisenverbindungen 258
- 3.4 Kupfer 260
  - 3.4.1 Allgemeines 260
  - 3.4.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 261
    - 3.4.2.1 Kupfermetall 261
    - 3.4.2.2 Kupferverbindungen 261
  - 3.4.3 Vorkommen und Rohstoffe 262
    - 3.4.3.1 Sekundärrohstoffe 263
  - 3.4.4 Herstellung von Kupfer 264
    - 3.4.4.1 Pyrometallurgische Herstellung von Kupfer 264
    - 3.4.4.2 Kupferraffination 267
    - 3.4.4.3 Hydrometallurgische Kupfergewinnung 269
  - 3.4.5 Herstellung von Kupferverbindungen 273
- 3.5 Silicium und seine anorganischen Verbindungen 275
  - 3.5.1 Allgemeines 275
  - 3.5.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 276
  - 3.5.3 Vorkommen und Rohstoffe 277
  - 3.5.4 Herstellung von Ferrosilicium und technischem Silicium 277
  - 3.5.5 Herstellung von anorganischen Siliciumverbindungen 279
    - 3.5.5.1 Siliciumhalogenide 280
    - 3.5.5.2 Kieselsäureester  $\text{Si}(\text{OR})_4$  281
- 3.6 Blei und seine Verbindungen 281
  - 3.6.1 Allgemeines 281
  - 3.6.2 Wirtschaftliche Bedeutung 282
  - 3.6.3 Vorkommen 283
  - 3.6.4 Herstellung 284
  - 3.6.5 Bleiverbindungen 287
    - 3.6.5.1 Bleiacetate, -carbonate 287
    - 3.6.5.2 Bleihalogenide 288
    - 3.6.5.3 Bleioxide 288
    - 3.6.5.4 Bleipigmente 291
    - 3.6.5.5 Bleisulfate 291
    - 3.6.5.6 Organische Bleiverbindungen 291
- 3.7 Zinn und seine Verbindungen 293
  - 3.7.1 Allgemeines 293
  - 3.7.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 293
  - 3.7.3 Vorkommen und Rohstoffe 294
  - 3.7.4 Herstellung von Zinn 295
  - 3.7.5 Herstellung und Verwendung von Zinnverbindungen 295
- 3.8 Buntmetalle 296
  - 3.8.1 Titan und seine Verbindungen 296

3.8.1.1	Allgemeines	296
3.8.1.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	296
3.8.1.3	Vorkommen und Rohstoffe	297
3.8.1.4	Herstellung von Titan	297
3.8.2	Vanadium	298
3.8.2.1	Allgemeines	298
3.8.2.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	298
3.8.2.3	Vorkommen und Rohstoffe	299
3.8.2.4	Vanadium, metallisch	300
3.8.2.5	Ferrovandium	300
3.8.2.6	Vanadiumverbindungen	301
3.8.3	Chrom und seine Verbindungen	301
3.8.3.1	Vorkommen	302
3.8.3.2	Herstellung	302
3.8.3.3	Wirtschaftliche Bedeutung	304
3.8.3.4	Chromverbindungen	306
3.8.4	Wolfram und seine Verbindungen	313
3.8.4.1	Allgemeines	313
3.8.4.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	314
3.8.4.3	Vorkommen und Rohstoffe	315
3.8.4.4	Gewinnung von Wolfram	316
3.8.4.5	Gewinnung von Wolframverbindungen	317
3.8.5	Mangan und Manganverbindungen	317
3.8.5.1	Allgemeines	317
3.8.5.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	318
3.8.5.3	Vorkommen und Rohstoffe	319
3.8.5.4	Herstellung von Mangan	320
3.8.5.5	Herstellung von Manganverbindungen	321
3.8.6	Molybdän und seine Verbindungen	326
3.8.6.1	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	327
3.8.6.2	Vorkommen und Rohstoffe	328
3.8.6.3	Gewinnung von Molybdän	329
3.8.6.4	Ferromolybdän	329
3.8.6.5	Gewinnung der Molybdänverbindungen	330
3.8.7	Cobalt	330
3.8.7.1	Allgemeines	330
3.8.7.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	331
3.8.7.3	Vorkommen und Rohstoffe	333
3.8.7.4	Herstellung von Cobalt	334
3.8.7.5	Herstellung von Cobaltverbindungen	338
3.8.8	Nickel	339
3.8.8.1	Allgemeines	339
3.8.8.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	340
3.8.8.3	Vorkommen und Rohstoffe	341
3.8.8.4	Herstellung von Nickel	342

- 3.8.8.5 Herstellung von Nickelverbindungen 348
- 3.8.9 Zink und seine Verbindungen 350
  - 3.8.9.1 Allgemeines 350
  - 3.8.9.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 350
  - 3.8.9.3 Vorkommen und Rohstoffe 351
  - 3.8.9.4 Herstellung von Zink 351
  - 3.8.9.5 Herstellung und Verwendung von Zinkverbindungen 352
- 3.9 Edelmetalle 352
  - 3.9.1 Gold und seine Verbindungen 352
    - 3.9.1.1 Allgemeines 353
    - 3.9.1.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 353
    - 3.9.1.3 Vorkommen und Rohstoffe 354
    - 3.9.1.4 Gewinnung und Herstellung von Gold 356
    - 3.9.1.5 Herstellung von Goldverbindungen 357
  - 3.9.2 Silber und seine Verbindungen 358
    - 3.9.2.1 Allgemeines 358
    - 3.9.2.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 359
    - 3.9.2.3 Vorkommen und Rohstoffe 359
    - 3.9.2.4 Herstellung von Silber 360
    - 3.9.2.5 Herstellung und Verwendung von Silberverbindungen 362
  - 3.9.3 Platin, Palladium und seine Verbindungen 363
    - 3.9.3.1 Allgemeines 364
    - 3.9.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 364
    - 3.9.3.3 Vorkommen und Rohstoffe 366
    - 3.9.3.4 Herstellung von Platin und Palladium 367
    - 3.9.3.5 Herstellung und Verwendung von Platin- und Palladiumverbindungen 369
  - 3.9.4 Osmium und seine Verbindungen 371
    - 3.9.4.1 Allgemeines 371
    - 3.9.4.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 372
    - 3.9.4.3 Vorkommen und Rohstoffe 372
    - 3.9.4.4 Herstellung und Verwendung von Osmiumverbindungen 373
  - 3.9.5 Iridium und seine Verbindungen 373
    - 3.9.5.1 Allgemeines 373
    - 3.9.5.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 374
    - 3.9.5.3 Vorkommen und Rohstoffe 375
    - 3.9.5.4 Herstellung von Iridium 375
    - 3.9.5.5 Herstellung und Verwendung von Iridiumverbindungen 375
  - 3.9.6 Rhodium und seine Verbindungen 376
    - 3.9.6.1 Allgemeines 376
    - 3.9.6.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 377
    - 3.9.6.3 Vorkommen und Rohstoffe 378
    - 3.9.6.4 Herstellung von Rhodium 378
    - 3.9.6.5 Herstellung und Verwendung von Rhodiumverbindungen 378
  - 3.9.7 Rhenium und seine Verbindungen 379

- 3.9.7.1 Allgemeines 379
- 3.9.7.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 380
- 3.9.7.3 Vorkommen und Rohstoffe 380
- 3.9.7.4 Herstellung von Rhenium 381
- 3.9.7.5 Herstellung und Verwendung von Rhenium(VII)-Verbindungen 381
- 3.9.8 Quecksilber und seine Verbindungen 382
- 3.9.8.1 Allgemeines 383
- 3.9.8.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 383
- 3.9.8.3 Vorkommen und Rohstoffe 385
- 3.9.8.4 Herstellung von Quecksilber 385
- 3.9.8.5 Herstellung und Verwendung von Quecksilberverbindungen 386
- 3.10 Anhang 392
  
- 4 Halbleiter- und Technologiematerialien 395**
- 4.1 Silicium als Halbleiter 395
- 4.1.1 Allgemeines 396
- 4.1.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 397
- 4.1.3 Vorkommen und Rohstoffe 398
- 4.1.4 Herstellung von Reinstsilicium 399
- 4.2 Germanium 407
- 4.2.1 Allgemeines 408
- 4.2.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 408
- 4.2.3 Vorkommen und Rohstoffe 409
- 4.2.4 Herstellung von Germanium 409
- 4.3 Gallium 409
- 4.3.1 Allgemeines 410
- 4.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 410
- 4.3.3 Vorkommen und Rohstoffe 410
- 4.3.4 Herstellung von Gallium 411
- 4.4 Indium 411
- 4.4.1 Allgemeines 412
- 4.4.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 412
- 4.4.3 Vorkommen und Rohstoffe 413
- 4.4.4 Herstellung von Indium 413
- 4.5 Bor 414
- 4.5.1 Allgemeines 414
- 4.5.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 414
- 4.5.3 Vorkommen und Rohstoffe 415
- 4.5.4 Herstellung von Bor 415
- 4.6 Arsen 416
- 4.6.1 Allgemeines 416
- 4.6.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 416
- 4.6.3 Vorkommen und Rohstoffe 417
- 4.6.4 Herstellung von Arsen 417
- 4.7 Antimon 418

- 4.7.1 Allgemeines 418
- 4.7.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 419
- 4.7.3 Vorkommen und Rohstoffe 419
- 4.7.4 Herstellung von Antimon 420
- 4.8 Seltene Erden 420
  - 4.8.1 Allgemeines 421
  - 4.8.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 422
  - 4.8.3 Vorkommen und Rohstoffe 422
  - 4.8.4 Herstellung der Seltenen Erden 423
    - 4.8.4.1 Scandium 423
    - 4.8.4.2 Yttrium, Lanthan und Lanthanoide 423
- 4.9 Niob 425
  - 4.9.1 Allgemeines 425
  - 4.9.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 426
  - 4.9.3 Vorkommen und Rohstoffe 426
  - 4.9.4 Herstellung 427
- 4.10 Tantal 427
  - 4.10.1 Allgemeines 428
  - 4.10.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 428
  - 4.10.3 Vorkommen und Rohstoffe 429
  - 4.10.4 Herstellung von Tantal 430
- 4.11 Verbindungshalbleiter 430
  
- 5 Organosiliciumverbindungen 433**
  - 5.1 Industriell bedeutende Organosiliciumverbindungen 433
    - 5.1.1 Nomenklatur 433
  - 5.2 Technisch bedeutende Silane 434
    - 5.2.1 Unsubstituierte Silane 434
    - 5.2.2 Halogensilane 434
    - 5.2.3 Organosilane 436
  - 5.3 Siloxane/Silicone 439
    - 5.3.1 Allgemeines 439
    - 5.3.2 Nomenklatur 439
    - 5.3.3 Wirtschaftliche Situation 440
    - 5.3.4 Herstellung 441
    - 5.3.5 Technische Durchführung der Polymerisation 445
    - 5.3.6 Herstellung verzweigter Polysiloxane 446
  - 5.4 Technische Siliconprodukte 447
    - 5.4.1 Siliconöle 447
      - 5.4.2 Siliconölfolgeprodukte 449
      - 5.4.3 Siliconkautschuke 450
        - 5.4.3.1 Kaltvulkanisierender Einkomponenten-Siliconkautschuk 450
        - 5.4.3.2 Kaltvulkanisierender Zweikomponentensiliconkautschuk 450
        - 5.4.3.3 Heißvulkanisierender, peroxidisch vernetzender Siliconkautschuk 451
        - 5.4.3.4 Heißvulkanisierender, additionsvernetzender Siliconkautschuk 452

5.4.3.5	Eigenschaften von Silicongummi	453
5.4.4	Siliconharze	453
5.4.5	Silicon-Copolymere, -Blockcopolymere und -Pfcopopolymere	454
<b>6</b>	<b>Anorganische Festkörper</b>	<b>457</b>
6.1	Silikatische Erzeugnisse	457
6.1.1	Glas	457
6.1.1.1	Allgemeines	457
6.1.1.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	460
6.1.1.3	Vorkommen und Rohstoffe	461
6.1.1.4	Herstellung von Glas	463
6.1.1.5	Glaseigenschaften und Verwendung	468
6.1.1.6	Herstellung von Alkalisilikaten	469
6.1.2	Zeolithe	470
6.1.2.1	Allgemeines	470
6.1.2.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	473
6.1.2.3	Vorkommen und Rohstoffe	475
6.1.2.4	Herstellung von synthetischen Zeolithen	475
6.2	Anorganische Fasern	478
6.2.1	Einführung	479
6.2.2	Verfahren zur Herstellung von anorganischen Fasern	481
6.2.2.1	Natürliche Mineralfasern	481
6.2.2.2	Künstliche Mineralfasern	482
6.2.2.3	Synthetische keramische Fasern	496
6.2.2.4	Kohlenstofffasern	502
6.2.2.5	Metallfasern	504
6.2.3	Ausgewählte Fasereigenschaften und Anwendungsfelder	505
6.2.3.1	Einführung	505
6.2.3.2	Natürliche Mineralwollen	508
6.2.3.3	Künstliche Mineralwollen	509
6.2.3.4	Textilglasfasern	511
6.2.3.5	Polykieselsäurefasern	513
6.2.3.6	Synthetische keramische Fasern	516
6.2.3.7	Kohlenstofffasern	518
6.2.3.8	Metallfasern	520
6.2.3.9	Faser-Verbundwerkstoffe	522
6.2.4	Physiologische und legislative Aspekte	526
6.3	Baustoffe	527
6.3.1	Allgemeines	528
6.3.2	Kalk	529
6.3.2.1	Allgemeines	529
6.3.2.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	529
6.3.2.3	Vorkommen und Rohstoffe	530
6.3.2.4	Gebannter Kalk	530
6.3.2.5	Gelöschter Kalk	531

- 6.3.2.6 Dampfgehärtete Baustoffe 533
- 6.3.3 Zement 533
  - 6.3.3.1 Allgemeines 533
  - 6.3.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 535
  - 6.3.3.3 Rohstoffe 535
  - 6.3.3.4 Portlandzement 535
  - 6.3.3.5 Hüttenzemente 539
  - 6.3.3.6 Puzzolanzemente 539
  - 6.3.3.7 Tonerdezement 541
  - 6.3.3.8 Asbestzement 541
  - 6.3.3.9 Sonstige Zementarten 542
  - 6.3.3.10 Vorgänge beim Erstarren von Zement 542
- 6.3.4 Gips 544
  - 6.3.4.1 Allgemeines 544
  - 6.3.4.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 547
  - 6.3.4.3 Vorkommen und Rohstoffe 548
  - 6.3.4.4 Chemieanhydrit aus der Flusssäureherstellung 550
  - 6.3.4.5 Chemiegips 550
- 6.3.5 Grobkeramische Produkte für die Bauindustrie 552
- 6.3.6 Blähprodukte 553
  - 6.3.6.1 Allgemeines 553
  - 6.3.6.2 Vorkommen und Rohstoffe 554
  - 6.3.6.3 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 556
  - 6.3.6.4 Herstellung von Blähprodukten 556
  - 6.3.6.5 Blähprodukte aus Gläsern (Foam-glass) 558
- 6.3.7 Geopolymere 558
  - 6.3.7.1 Allgemeines 558
  - 6.3.7.2 Verwendung und wirtschaftliche Bedeutung 559
  - 6.3.7.3 Vorkommen und Rohstoffe 559
  - 6.3.7.4 Reaktion 560
  - 6.3.7.5 Eigenschaften 561
- 6.4 Keramik 562
  - 6.4.1 Allgemeines 563
  - 6.4.2 Einteilung der keramischen Erzeugnisse 563
  - 6.4.3 Allgemeine Verfahrensschritte zur Herstellung von Keramiken 565
  - 6.4.4 Tonkeramische Erzeugnisse 565
    - 6.4.4.1 Zusammensetzung und Rohstoffe 567
    - 6.4.4.2 Abbau und Aufbereitung von Rohkaolin 569
    - 6.4.4.3 Herstellung tonkeramischer Massen 569
      - 6.4.4.4 Formgebungsverfahren 570
      - 6.4.4.5 Trocknungsverfahren 574
      - 6.4.4.6 Keramischer Brand 574
      - 6.4.4.7 Eigenschaften und Anwendung tonkeramischer Produkte 577
    - 6.4.4.5 Sonderkeramische Erzeugnisse 579
      - 6.4.4.5.1 Oxidkeramik 579

- 6.4.5.2 Elektro- und Magnetokeramik 585
- 6.4.5.3 Feuerfeste Keramik 591
- 6.4.5.4 Nichtoxidkeramik 599
- 6.5 Hartstoffe 609
- 6.5.1 Allgemeines 609
- 6.5.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 610
- 6.5.3 Allgemeine Herstellungsverfahren und Eigenschaften von Metallcarbiden 610
- 6.5.4 Carbide der IV. Nebengruppe 611
- 6.5.4.1 Titancarbid 611
- 6.5.4.2 Zirconiumcarbid und Hafniumcarbid 613
- 6.5.5 Carbide der V. Nebengruppe 613
- 6.5.5.1 Vanadiumcarbid 613
- 6.5.5.2 Niobcarbid und Tantalcarbid 613
- 6.5.6 Carbide der VI. Nebengruppe 613
- 6.5.6.1 Chromcarbid 613
- 6.5.6.2 Molybdän-carbid 614
- 6.5.6.3 Wolframcarbid 614
- 6.5.6.4 Hartmetalllegierungen auf Basis von Wolframcarbid 615
- 6.5.7 Thoriumcarbid und Urancarbid 616
- 6.5.8 Metallnitride 617
- 6.5.9 Metallboride 618
- 6.5.10 Metallsilicide 619
- 6.6 Kohlenstoffmodifikationen 620
- 6.6.1 Allgemeine Vorbemerkungen 620
- 6.6.2 Diamant 620
- 6.6.2.1 Allgemeines 621
- 6.6.2.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 622
- 6.6.2.3 Gewinnung natürlicher Diamanten 623
- 6.6.2.4 Herstellung synthetischer Diamanten 624
- 6.6.3 Natürlicher Graphit 626
- 6.6.3.1 Allgemeines 627
- 6.6.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 627
- 6.6.3.3 Vorkommen, Rohstoffe und Gewinnung 629
- 6.6.4 Synthetischer Kohlenstoff und synthetischer Graphit 630
- 6.6.4.1 Allgemeines 633
- 6.6.4.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung 633
- 6.6.4.3 Vorkommen und Rohstoffe 634
- 6.6.4.4 Herstellung von synthetischem Kohlenstoff und synthetischem Graphit 635
- 6.6.5 Spezielle Kohlenstoff- und Graphitarten 640
- 6.6.5.1 Allgemeines 641
- 6.6.5.2 Pyrokohlenstoff und Pyrographit 642
- 6.6.5.3 Glaskohlenstoff und Schaumkohlenstoff 643
- 6.6.5.4 Graphitfolien und -membranen 644

6.6.6	Carbon Black	645
6.6.6.1	Allgemeines	647
6.6.6.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	647
6.6.6.3	Herstellung von Carbon Black	651
6.6.7	Aktivkohle	656
6.6.7.1	Allgemeines	657
6.6.7.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	657
6.6.7.3	Vorkommen und Rohstoffe	659
6.6.7.4	Herstellung von Aktivkohle	659
6.7	Füllstoffe	662
6.7.1	Allgemeines	665
6.7.2	Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung	666
6.7.3	Vorkommen, Rohstoffe und Herstellung von Füllstoffen	668
6.7.3.1	Natürliche Füllstoffe	668
6.7.3.2	Synthetische Füllstoffe	670
6.8	Anorganische Pigmente	675
6.8.1	Allgemeines	676
6.8.2	Weißpigmente	680
6.8.2.1	Titandioxid	682
6.8.2.2	Lithopone und Zinksulfidpigmente	688
6.8.2.3	Zinkoxid-Weißpigmente	689
6.8.3	Buntpigmente	690
6.8.3.1	Eisenoxidpigmente	694
6.8.3.2	Chrom(III)-oxidpigmente	699
6.8.3.3	Chromat- und Molybdätpigmente	701
6.8.3.4	Mischphasenpigmente und keramische Farbkörper	702
6.8.3.5	Cadmiumpigmente	704
6.8.3.6	Bismutvanadatpigmente	705
6.8.3.7	Eisenblaupigmente	706
6.8.3.8	Ultramarinpigmente	707
6.8.4	Spezialpigmente	708
6.8.4.1	Korrosionsschutzpigmente	709
6.8.4.2	Effektpigmente	711
6.8.4.3	Lumineszenzpigmente	713
6.8.4.4	Magnetpigmente	713
<b>7</b>	<b>Kernbrennstoffkreislauf</b>	<b>721</b>
7.1	Die Bedeutung der Kernenergie in der Energiewirtschaft	721
7.2	Allgemeines zum Brennstoffkreislauf	725
7.3	Verfügbarkeit von Uran	726
7.4	Kernreakortypen	728
7.4.1	Allgemeines	729
7.4.2	Leichtwasserreaktoren	729
7.4.2.1	Siedewasserreaktoren	729
7.4.2.2	Druckwasserreaktoren	730

7.4.3	Graphitmoderierte Reaktoren	730
7.4.3.1	Gasgekühlte Reaktoren	730
7.4.3.2	Leichtwassergekühlte Reaktoren	731
7.4.4	Schwerwasserreaktoren	732
7.4.5	Schnellbrutreaktoren	732
7.5	Kernbrennstoffgewinnung	733
7.5.1	Urankonzentrat-(„Yellow-cake“-)Gewinnung	736
7.5.1.1	Uran aus Uranerzen	736
7.5.1.2	Uran aus Phosphaterzen bzw. Nassphosphorsäure	740
7.5.1.3	Uran aus Meerwasser	741
7.5.2	Konversion von Urankonzentrat zu Uranhexafluorid	741
7.5.2.1	Allgemeines	741
7.5.2.2	Nassverfahren zur Herstellung von UF <sub>6</sub>	741
7.5.2.3	Trockenverfahren zur Herstellung von UF <sub>6</sub>	742
7.5.3	<sup>235</sup> U-Anreicherung	743
7.5.4	Rekonversion von UF <sub>6</sub> in Kernbrennstoffe	744
7.5.4.1	In Urandioxid	744
7.5.5	Andere Urankernbrennstoffe	746
7.5.5.1	Uranmetall	746
7.5.5.2	Uran-Plutonium-Mischoxide	746
7.5.6	Herstellung der Brennelemente	747
7.6	Entsorgung von Kernkraftwerken	747
7.6.1	Allgemeines	750
7.6.2	Teilschritte der Entsorgung	752
7.6.2.1	Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente	752
7.6.2.2	Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente	752
7.6.2.3	Weiterverarbeitung der Uran- bzw. Plutoniumlösungen	754
7.6.2.4	Konditionierung der radioaktiven Abfälle	755
7.6.2.5	Endlagerung radioaktiver Abfälle	757

<b>Stichwortverzeichnis</b>	761
-----------------------------	-----

## Vorwort zur 4. Auflage

Die Chemieindustrie ist derzeit gravierenden Veränderungen ausgesetzt. Mehr denn je rücken Fragen der Energie- und Rohstoffeffizienz in den Blickpunkt der Verfahrensentwicklung. So sind nicht nur „Energiewende“ und „Rohstoffwandel“ mittlerweile häufig gebrauchte Schlagwörter, vielmehr zeigt sich an Exportbeschränkungen für beispielsweise Seltene Erden seitens des derzeitigen quasi Monopol-exporteurs China, sowie Preissprüngen für strategisch wichtige Metalle wie Tantal, dass Fragen der Rohstoffverfügbarkeit und der Sicherung der Rohstoffbasis in Wirtschaft und Gesellschaft angekommen sind und eine noch vor wenigen Jahren kaum für möglich gehaltene Rolle einnehmen.

Diese Entwicklung macht einen Aufbruch in eine neue Ära des globalen Wirtschaftens nötig, bei dem die Chemie zur Lösung der anstehenden Fragestellungen wieder in den Vordergrund rückt. So steht die moderne Chemie am Beginn einer Renaissance, denn wie kaum ein anderer Wissenschaftszweig ist sie in der Lage, mit Hilfe neuer zukunftsfähiger Verfahren wichtige Rohstoffe unter dem Primat der Wirtschaftlichkeit aus Primär- und Sekundärquellen zugänglich zu machen, ohne dabei neue Abhängigkeiten aufzubauen.

Grund genug also für eine umfassende Darstellung der modernen anorganisch-chemischen Prozesskunde. Vieles hat sich seit der 3. Auflage von 1998 geändert. Manchem Verfahren, wie z.B. dem der Lithiumgewinnung, wurde damals noch nicht diejenige Bedeutung beigemessen, die wir heute kennen. Die „Industrielle anorganische Chemie“ wurde daher einer tiefgreifenden Neustrukturierung unterzogen und Schwerpunkte neu gesetzt, vor allem aber wurde versucht, durchgängig die Rohstoffbasis sowie die wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung der einzelnen Produkte darzustellen und das Zahlenmaterial je nach Verfügbarkeit der Produktionsdaten bestmöglich zu aktualisieren.

Die aus der 3. Auflage bekannte Gliederung des Buches wurde indes weitestgehend beibehalten und der Inhalt an entsprechender Stelle durch neue Abschnitte ergänzt. Die einzelnen Kapitel dieses Buches wurden dem Bedarf entsprechend – teils aber sogar grundlegend – überarbeitet. So gelang es, Bewährtes beizubehalten bzw. an die heutige Situation anzupassen und zugleich mit Neufassungen einzelner Kapitel den aktuellen Stand des Wissens und der Technik herzustellen. Sichtbares Zeichen dieser Neustrukturierung ist das Wegfallen des Randtextes, der durch ein



## Kurzbiografien der Autoren



Prof. Dr. Martin Bertau, Lehrstuhl für Technische Chemie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, promovierte 1997 an der Universität Freiburg/Br. Danach leitete er die Biotechnologie-Abteilung der Rohner AG (Dynamit-Nobel-Gruppe) in Basel, Schweiz. Im Jahr 2000 wechselte er an die Technische Universität Dresden und leitet seit 2006 das Institut für Technische Chemie und der TU Bergakademie Freiberg. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in den Bereichen Rohstoffchemie und Weiße Biotechnologie mit dem Ziel der Entwicklung integrierter Prozesse (Zero-Waste-Concept) zur Produktion und Recycling von Chemierohstoffen wie z.B. Seltenen Erden, Lithium, Elektronikmetallen und Silicium, aber auch der Verwertung von CO<sub>2</sub> sowie Lignocellulose zur Erzeugung chemischer Grundstoffe. Für seine Arbeiten zum Phosphatrecycling wurde er 2012 mit dem Ressourceneffizienzpreis des Bundeswirtschaftsministers ausgezeichnet.



Prof. Dr. Armin Müller studierte Chemie an der Bergakademie Freiberg und promovierte 1989 auf dem Gebiet der Salzhydratschmelzen. Seine berufliche Laufbahn in der chemischen Industrie begann er 1991 bei der Bayer AG in Krefeld auf dem Gebiet der anorganischen Pigmente. Er wechselte 1995 als Betriebsleiter in das Geschäftsfeld Ingenieurkeramik und Photovoltaik der Bayer AG und 1996 als Produktionsleiter zur Bayer Solar GmbH nach Freiberg. Bei der Bayer Solar GmbH und der im Jahre 2000 aus dieser hervorgegan-

nen Deutschen Solar GmbH war er bis 2003 als Produktionsleiter und bis 2007 als Leiter Forschung und Entwicklung tätig. In dieser Zeit leitete er mehrere Projekte zur Entwicklung neuer Technologien für die Herstellung von Wafern, Zellen und Modulen für die Photovoltaik sowie zur Materialentwicklung. Von 2007 bis 2011 war Prof. Dr. Armin Müller Vorstand der Sunicon AG und ist gegenwärtig als Direktor für strategische Materialien der SolarWorld AG tätig. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen auf den Gebieten der Herstellung von Reinstsilicium und der Kristallisation von Silicium für die Photovoltaik. Prof. Dr. Armin Müller ist seit 2008 Honorarprofessor für Anorganisch-chemische Technologien an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.



Dr. Peter Fröhlich studierte Chemie an der TU Bergakademie Freiberg. Seine Promotion begann er 2006 am Institut für Allgemeine Biochemie der TU Dresden im Bereich funktionalisierter Polysiloxane und setzte seine Arbeiten nach seinem Wechsel an die TU Bergakademie Freiberg am Institut für Technische Chemie bei Prof. Dr. M. Bertau fort. Seit 2011 leitet er die Arbeitsgruppe zur Aufbereitung von Sekundärrohstoffen mit besonderem Forschungsinteresse auf einer geschlossenen Verwertung aller Wert- und Reststoffe unter Einbeziehung von Wirtschaftlichkeitsanalysen zur Umsetzung in den industriellen Maßstab.



Dr. Michael Katzberg, promovierte 2009 an der Technischen Universität Dresden im Arbeitskreis von Prof. Dr. Martin Bertau auf dem Gebiet der Industriellen (weißen) Biotechnologie, nach einem Forschungsaufenthalt an der Universität Lund sowie einem Studium der Lebensmittelchemie (2000–2005). Anschließend wechselte er ans Institut für Technische Chemie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg wo er sich in mehreren Projekten mit der Erforschung und Entwicklung von nachhaltigen Technologien zur Produktion von Grund- und Feinchemikalien beschäftigte, bevor er 2012 zum Chemieanlagenbauer ThyssenKrupp Uhde GmbH wechselte.

## Geleitwort

Die anorganische Chemie hat von jeher eine wichtige Rolle bei der Entwicklung der Menschheit gespielt. Bereits in der Frühgeschichte lernte der Mensch, Stoffe umzuwandeln und Gebrauchsgegenstände zu fertigen und zu nutzen.

Von der Keramik über die Metalle bis hin zu modernen Halbleiterwerkstoffen beeinflusst die anorganische Chemie bis heute unser Leben und unsere Umwelt.

Mit dem Erscheinen der ersten Auflage der „Industriellen Anorganischen Chemie“ im Jahre 1984 wurde erstmals das Vorkommen, die Herstellung und Verwendung anorganischer Materialien und ihre industrielle Bedeutung in übersichtlicher Form zusammengefasst. Seitdem wurden verstärkt Anstrengungen unternommen, Technologien und Verfahren zu entwickeln, um energieeffizienter und ökologisch verträglicher zu produzieren sowie neue Materialien und Werkstoffe für neue Anwendungen herzustellen.

Mit dem neuen Herausgeberteam wird das Buch weitergeführt und grundlegend überarbeitet. Das Lehrbuch bietet in übersichtlicher Form eine aktuelle Bestandsaufnahme der industriellen anorganischen Chemie. Das Autorenteam versteht es, in knapper und präziser Form einen fundierten Überblick zu Herstellungsverfahren, wirtschaftlicher Bedeutung und Verwendung der Produkte zu geben. Ein besonderes Augenmerk richten die Autoren dabei auf die Ökologie, den Rohstoff- und Energieverbrauch, Fragen, die unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit an Bedeutung gewinnen. Für einzelne Kapitel liefern dabei Vertreter aus der Industrie entsprechende Beiträge. Den Veränderungen in der industriellen Gewichtung tragen die Autoren Rechnung durch Aufnahme und Erweiterung von hochaktuellen Themen wie Alkali- und Erdalkalimetallen, insbesondere Lithium und gehen auf die Verbindungen der Seltenerdmetalle ein. Neu aufgenommen wurden Kapitel zu technischen Gasen, Halbleiter- und Elektronikmaterialien sowie den Edelmetallen. Um den Umfang im Rahmen zu halten, wurden die Bereiche Baustoffe und Kernbrennstoffe gestrafft.

Insbesondere durch die übersichtliche Darstellungsform erscheint uns das Buch ein gelungenes Hilfsmittel, um sich rasch über die wichtigsten Entwicklungen in der anorganischen Chemie und ihre industrielle Bedeutung zu informieren. Wir

wünschen dem neuen Autorenteam weiterhin eine glückliche Hand, um das Werk auch zukünftig zu begleiten.

Krefeld, den 22.05.2013

*K. H. Büchel*  
Burscheid

*H. H. Moretto*  
Leverkusen

*P. Woditsch*  
Krefeld

# 1

## Anorganische Grundprodukte

### 1.1

#### Wasserstoff und seine Verbindungen

#### 1.1.1

##### Wasserstoff

###### Quergelesen

Die Gewinnung von Wasserstoff erfolgt typischerweise petrochemisch aus Kohlenwasserstoffen. Elektrolytische Verfahren sind insbesondere vor dem Hintergrund der Nutzung von Wasserstoff als chemischem Energiespeicher (seine Energiedichte beträgt 121 MJ/kg) interessant, machen derzeit aber nur ca. 10 % der Produktionskapazität aus. Neue Verfahrenskonzepte lassen gegenwärtig keine kurzfristige Umsetzbarkeit in den technischen Maßstab erkennen.

#### 1.1.1.1 Allgemeines

Wasserstoff ist das häufigste Element im Universum; auf der Erde (Litho-, Hydro-, Bio- und Atmosphäre) ist er vornehmlich in Form von Wasser und Hydraten sowie als Bestandteil der Biomasse und fossiler Rohstoffe – mit einem Anteil von etwas unter 1 % Massenanteil (etwa 15 Stoffmengenanteile in %, bezogen auf die Atome) – das neunthäufigste Element. Wasserstoff spielt in zahlreichen organisch-chemischen wie anorganisch-chemischen Prozessen eine tragende Rolle.

#### 1.1.1.2 Wirtschaftliche Bedeutung und Verwendung

Wasserstoff gewinnt neben seiner großen Bedeutung als Chemierohstoff und Industriechemikalie insbesondere seit der ersten Ölkrise 1973/74 zunehmendes, wenn auch immer noch sehr spekulatives Interesse als praktisch unerschöpflicher (sekundärer) Energieträger (Brenn-, Kraftstoff) anstelle oder neben dem elektrischen Strom. Die Gründe liegen in der (gewichtsspezifisch) hohen Energiedichte von 121 kJ/g (Methan nur 50,3 kJ/g), der hohen Umweltverträglichkeit, seiner Ungiftigkeit und der guten Transport- und Speichermöglichkeiten.

Die weltweite Produktion an Wasserstoff lag 2010 bei etwa 595 Mrd. m<sup>3</sup>, d.h. etwa 53 Mio. t. Für Deutschland wird im Jahr 2011 ein Produktionsvolumen von

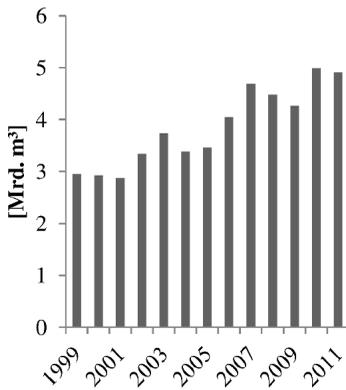


Abb. 1.1 Wasserstoffproduktion in Deutschland

etwa 55 Mrd. m<sup>3</sup> ausgewiesen. Die tatsächlichen Produktionszahlen dürften noch etwas höher liegen, da die Mengen, die in Raffinerien als Koppelprodukt anfallen und intern an anderer Stelle wieder eingesetzt werden, in den Zahlen nicht enthalten sind. Abbildung 1.1 zeigt den Verlauf der Wasserstoffproduktion in Deutschland seit 1999.

88 % des weltweit erzeugten bzw. als Zwangsanfall produzierten Wasserstoffes werden direkt beim Erzeuger weiterverarbeitet. Dadurch, dass Raffinerien verstärkt dazu übergehen, anstelle eigener Wasserstoffanlagen Fremdanlagen von Fachfirmen zu nutzen, dürfte der Anteil des über den Markt abgesetzten Wasserstoffes in Zukunft ansteigen.

Die Nutzung von Wasserstoff erfolgt überwiegend für die Ammoniaksynthese und für Raffinerieprozesse (z.B. Hydrocracken zur Verbesserung der Qualität von Erdölprodukten; Hydrotreating, z.B. hydrierende Entschwefelung).

Im unteren Prozentbereich wird er ebenfalls für die Methanolsynthese, Hydrierungen in der organischen Chemie (Fetthärtung, Anilin- und Cyclohexansynthese), in der Elektronik (Schutzgas bei der Halbleiterherstellung), in der Metallurgie (z.B. in Form von Synthesegas zur Direktreduktion von Eisenschwamm, als Reduktions- oder Schutzgas bei Temper- und Umschmelzprozessen), in der Glasindustrie, zur Chlorwasserstoffherstellung sowie zum autogenen Schweißen und Schneiden (Knallgasgebläse) und in der Schutzgasschweißtechnik (z.B. mit Argon/Wasserstoff) benötigt. In der Kraftwerkstechnik dient Wasserstoff aufgrund seiner hohen Wärmekapazität als Kühlmedium für Generatoren (Abb. 1.2).

Das Einsatzgebiet der Erdölraffination wächst zurzeit am stärksten. Dies ist einerseits durch die Umweltgesetzgebung in den Industrieländern bedingt, die einen höheren Wasserstoffeinsatz erfordert, andererseits durch den steigenden Anteil von hochsiedenden Kohlenwasserstoffen, die wasserstoffärmer sind als niedrigsiedende Kohlenwasserstoffe.

Der Wasserstoffanteil, der in den Handel kommt, wird i.A. in gasförmiger oder flüssiger Form befördert. Zum Teil wird er gasförmig in komprimierter Form (z.B. 20 MPa) in Stahlzylindern oder Flaschenbündeln oder flüssig (kryogen) bei -253 °C in hochisolierten Drucktankwagen transportiert. Auch durch Rohrleitungen kann