

# Inhalt

Vorwort — V

Abbildungsverzeichnis — XXI

Tabellenverzeichnis — XXIX

## Teil I: Einleitung

- 1 Konzentration, Anteil, Verhältnis — 3**
  - 1.1 Gehaltsangaben — 3
  - 1.2 Konzentrationen — 3
  - 1.3 Anteile und Verhältnisse — 4
  
- 2 Sensoren für Konzentration und Analytik — 7**
  - 2.1 Physikalische Sensorik — 8
  - 2.2 Optische Spektrometrie — 8
  - 2.3 Chemische Sensorik — 9
  - 2.4 Elektrochemische Sensorik — 9

## Teil II: Physikalische Sensorik

- 3 Massenspektrometrie — 13**
  - 3.1 Einleitung — 13
  - 3.2 Messprinzip — 14
    - 3.2.1 Physikalische Grundlagen — 14
    - 3.2.2 Aufbau und Funktion — 16
    - 3.2.3 Massenspektrogramm — 21
  - 3.3 Anwendungen — 22
  - 3.4 Kommerzielle Produkte — 23
  - 3.5 Zusammenfassung — 25
  
- 4 Ionenmobilitätsspektrometrie — 27**
  - 4.1 Einleitung — 27
  - 4.2 Messprinzip — 27
    - 4.2.1 Physikalische Grundlagen — 27
    - 4.2.2 Messaufbau — 28
    - 4.2.3 Messvorgang — 32

4.3	Anwendungen —	<b>36</b>
4.4	Kommerzielle Produkte —	<b>38</b>
4.5	Zusammenfassung —	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>Chromatografie —</b>	<b>43</b>
5.1	Einleitung —	<b>43</b>
5.2	Messprinzip —	<b>44</b>
5.2.1	Der chromatografische Prozess —	<b>45</b>
5.2.2	Das Chromatogramm und seine Aussage —	<b>46</b>
5.2.3	Gaschromatografie —	<b>48</b>
5.2.4	Dünnschichtchromatografie —	<b>49</b>
5.2.5	Hochleistungsflüssigkeitschromatografie —	<b>51</b>
5.3	Anwendungen —	<b>52</b>
5.3.1	Gaschromatografie —	<b>53</b>
5.3.2	Dünnschichtchromatografie —	<b>53</b>
5.3.3	Hochleistungsflüssigkeitschromatografie —	<b>55</b>
5.4	Kommerzielle Produkte —	<b>55</b>
5.4.1	Gaschromatografie —	<b>56</b>
5.4.2	Dünnschichtchromatografie —	<b>57</b>
5.4.3	Hochleistungsflüssigkeitschromatografie —	<b>58</b>
5.5	Zusammenfassung —	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>Paramagnetische Sensoren —</b>	<b>61</b>
6.1	Einleitung —	<b>61</b>
6.2	Messprinzip —	<b>62</b>
6.2.1	Physikalische Grundlagen —	<b>62</b>
6.2.2	Thermomagnetisches Verfahren —	<b>63</b>
6.2.3	Magnetomechanisches Verfahren —	<b>66</b>
6.2.4	Magnetopneumatisches Verfahren —	<b>68</b>
6.3	Anwendungen —	<b>69</b>
6.3.1	Anwendungsbeispiele —	<b>69</b>
6.3.2	Thermomagnetische Sauerstoffanalysatoren —	<b>71</b>
6.3.3	Magnetomechanische Sauerstoffanalysatoren —	<b>71</b>
6.3.4	Magnetopneumatische Sauerstoffanalysatoren —	<b>72</b>
6.4	Kommerzielle Produkte —	<b>72</b>
6.4.1	Thermomagnetische Sauerstoffanalysatoren —	<b>72</b>
6.4.2	Magnetomechanische Sauerstoffsensoren —	<b>73</b>
6.4.3	Magnetopneumatische Sauerstoffanalysatoren —	<b>75</b>
6.5	Zusammenfassung —	<b>76</b>

- 7 Wärmeleitfähigkeitssensoren — 79**
  - 7.1 Einleitung — 79
  - 7.2 Messprinzip — 79
    - 7.2.1 Wärmeleitfähigkeit — 79
    - 7.2.2 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der molaren Masse — 81
    - 7.2.3 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur und des Drucks — 82
    - 7.2.4 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Gaszusammensetzung — 84
    - 7.2.5 Aufbau und Konzentrationsmessung — 84
  - 7.3 Anwendungen — 86
  - 7.4 Kommerzielle Produkte — 87
  - 7.5 Zusammenfassung — 89
  
- 8 Halbleitersensoren — 91**
  - 8.1 Einleitung — 91
  - 8.2 Messprinzip — 91
    - 8.2.1 Physikalische und chemische Grundlagen — 92
    - 8.2.2 Resistives Messprinzip — 96
    - 8.2.3 Potenziometrisches Messprinzip — 99
    - 8.2.4 Eigenschaften von Halbleitersensoren — 100
  - 8.3 Anwendungen — 102
    - 8.3.1 Metalloxidhalbleiter — 102
    - 8.3.2 ChemFET — 103
  - 8.4 Kommerzielle Produkte — 105
  - 8.5 Zusammenfassung — 108
  
- 9 Sensoren auf Basis elektrisch leitfähiger Polymere — 111**
  - 9.1 Einleitung — 111
  - 9.2 Messprinzip — 112
    - 9.2.1 Elektrisch leitfähige Polymere — 112
    - 9.2.2 Interaktion zwischen Polymer und Analyt — 114
    - 9.2.3 Chemosensoren auf Basis elektrisch leitfähiger Polymere — 116
    - 9.2.4 Optische Chemosensoren auf Basis elektrisch leitfähiger Polymere — 117
  - 9.3 Anwendungen — 120
    - 9.3.1 Explosivstoffdetektion — 121
    - 9.3.2 Gassensoren — 122
    - 9.3.3 Leckagedetektion — 123
    - 9.3.4 Ionensensor — 123
    - 9.3.5 pH-Sensor — 124
    - 9.3.6 Biomedizinische Anwendungen — 124
  - 9.4 Kommerzielle Produkte — 125
  - 9.5 Zusammenfassung — 126

<b>10</b>	<b>Sensoren auf Basis akustischer Oberflächenwellen — 129</b>
10.1	Einleitung — 129
10.2	Messprinzip — 130
10.2.1	Akustische Oberflächenwellen — 130
10.2.2	SAW-Sensor — 131
10.2.3	SAW-Gassensor — 133
10.2.4	Drahtloser SAW-Gassensor — 135
10.3	Anwendungen — 136
10.4	Kommerzielle Produkte — 138
10.4.1	Hazmatcad — 138
10.4.2	zNose — 139
10.5	Zusammenfassung — 140
<b>11</b>	<b>Piezoelektrische Quarzsensoren — 143</b>
11.1	Einleitung — 143
11.2	Messprinzip — 143
11.2.1	Piezoelektrizität — 143
11.2.2	Quarzkristallmikrowaagen — 146
11.2.3	QCM-Chemosensor — 149
11.3	Anwendungen — 151
11.4	Kommerzielle Produkte — 152
11.5	Zusammenfassung — 155
<b>12</b>	<b>Gravimetrische Staubsensoren — 157</b>
12.1	Einleitung — 157
12.2	Messprinzip — 158
12.3	Anwendungen — 159
12.4	Kommerzielle Produkte — 160
12.5	Zusammenfassung — 164
<b>13</b>	<b>Refraktometrie — 165</b>
13.1	Einleitung — 165
13.2	Messprinzip — 165
13.2.1	Physikalische Grundlagen — 165
13.2.2	Funktion und Aufbau — 169
13.3	Anwendungen — 172
13.4	Kommerzielle Produkte — 176
13.4.1	Abbe-Refraktometer — 176
13.4.2	Handrefraktometer — 177
13.4.3	Übersicht Refraktometerhersteller — 179
13.5	Zusammenfassung — 179

- 14 Polarimetrie — 181**
  - 14.1 Einleitung — 181
  - 14.2 Messprinzip — 181
    - 14.2.1 Polarisierung — 182
    - 14.2.2 Optische Aktivität — 183
    - 14.2.3 Chiralität — 184
    - 14.2.4 Spezifischer Drehwinkel — 185
    - 14.2.5 Polarimeter — 186
  - 14.3 Anwendungen — 187
  - 14.4 Kommerzielle Produkte — 189
  - 14.5 Zusammenfassung — 192
  
- 15 Flammenionisationsdetektoren — 193**
  - 15.1 Einleitung — 193
  - 15.2 Messprinzip — 194
    - 15.2.1 Physikalische und chemische Grundlagen — 194
    - 15.2.2 Aufbau und Funktionsweise — 195
    - 15.2.3 Berechnung der Kohlenstoffmassenkonzentration — 197
  - 15.3 Anwendungen — 198
    - 15.3.1 Nutzung in Verbindung mit anderen Verfahren — 198
    - 15.3.2 Eigenständige Nutzung — 200
  - 15.4 Kommerzielle Produkte — 201
    - 15.4.1 TESTA GmbH — 201
    - 15.4.2 Ratfish Analysensysteme GmbH — 202
    - 15.4.3 Hermann Sewerin GmbH — 203
  - 15.5 Zusammenfassung — 204
  
- 16 Photoionisationsdetektoren — 207**
  - 16.1 Einleitung — 207
  - 16.2 Messprinzip — 208
    - 16.2.1 Physikalische Grundlagen — 208
    - 16.2.2 Messverfahren — 209
    - 16.2.3 Funktion und Aufbau — 211
  - 16.3 Anwendungen — 213
    - 16.3.1 Einsatzgebiete — 213
    - 16.3.2 Messgenauigkeit und Kalibrierung — 214
  - 16.4 Kommerzielle Produkte — 215
    - 16.4.1 Stationäre Geräte — 215
    - 16.4.2 Mobile Geräte — 216
  - 16.5 Zusammenfassung — 217

- 17 Pyknometrie — 219**
- 17.1 Einleitung — 219
- 17.2 Messprinzip — 219
- 17.2.1 Physikalische Grundlagen — 220
- 17.2.2 Messaufbau und Messverfahren — 221
- 17.3 Anwendungen — 227
- 17.4 Kommerzielle Produkte — 229
- 17.5 Zusammenfassung — 234

### **Teil III: Optische Spektrometrie**

- 18 Transmissionsspektrometrie — 239**
- 18.1 Einleitung — 239
- 18.2 Messprinzip — 240
- 18.2.1 Physikalische Grundlagen — 240
- 18.2.2 Dispersive Spektrometer — 244
- 18.2.3 Nicht dispersive Spektrometer — 246
- 18.2.4 Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer — 247
- 18.3 Anwendungen — 248
- 18.3.1 UV/VIS-Spektrometer — 249
- 18.3.2 IR-Spektrometer — 250
- 18.4 Kommerzielle Produkte — 250
- 18.4.1 Gascard von Edinburgh Sensors Ltd. — 251
- 18.4.2 FTIR Spektrometer MIR8025 der Newport Corporation — 252
- 18.5 Zusammenfassung — 253
  
- 19 Photoakustische Spektrometrie — 255**
- 19.1 Einleitung — 255
- 19.2 Messprinzip — 255
- 19.2.1 Photoakustischer Effekt — 256
- 19.2.2 Aufbau eines photoakustischen Spektrometers — 259
- 19.3 Anwendungen — 261
- 19.4 Kommerzielle Produkte — 264
- 19.4.1 Multigasanalytoren ONE PULSE/ONE SHED von Gasera Ltd. — 264
- 19.4.2 Gasmonitore INNOVA 1314i/INNOVA 1512 der LumaSense Technologies A/S — 267
- 19.5 Zusammenfassung — 269
  
- 20 Cavity-Ring-Down-Spektrometrie — 271**
- 20.1 Einleitung — 271
- 20.2 Messprinzip — 272
- 20.2.1 Übersicht — 272

- 20.2.2      Sensoraufbau und Signalentstehung — 273
- 20.2.3      Physikalische Grundlagen — 275
- 20.2.4      Bestimmung der Teilchendichte — 276
- 20.3        Anwendungen — 279
- 20.3.1      Analyse der atmosphärischen Zusammensetzung — 279
- 20.3.2      Analytische Chemie — 280
- 20.3.3      Analyse von Verbrennungsgasen — 281
- 20.3.4      Medizinische Applikationen — 282
- 20.4        Kommerzielle Produkte — 283
- 20.5        Zusammenfassung — 287
  
- 21        Atomemissionsspektrometrie — 289**
- 21.1        Einleitung — 289
- 21.2        Messprinzip — 290
- 21.2.1      Physikalische Grundlagen — 290
- 21.2.2      Atomanregung — 292
- 21.2.3      Paschen-Runge-Anordnung — 294
- 21.2.4      Echelle-Anordnung — 295
- 21.2.5      Strahlungsdetektoren und Spektrenauswertung — 297
- 21.3        Anwendungen — 298
- 21.3.1      Anwendungsgebiete — 299
- 21.3.2      Probenvorbereitung und Analysendurchführung — 300
- 21.3.3      Messergebnisse — 301
- 21.4        Kommerzielle Produkte — 302
- 21.5        Zusammenfassung — 303
  
- 22        Fluoreszenzspektrometrie — 305**
- 22.1        Einleitung — 305
- 22.2        Messprinzip — 306
- 22.2.1      Fluoreszenz — 306
- 22.2.2      Messverfahren und Aufbau — 308
- 22.3        Anwendungen — 311
- 22.4        Kommerzielle Produkte — 316
- 22.5        Zusammenfassung — 320
  
- 23        Kernspinresonanzspektrometrie — 323**
- 23.1        Einleitung — 323
- 23.2        Messprinzip — 324
- 23.2.1      Physikalische Grundlagen — 324
- 23.2.2      Continuous-Wave-Verfahren — 327
- 23.2.3      Impuls-Fourier-Transform-Verfahren — 329
- 23.2.4      Kernspinresonanzspektrogramm — 332
- 23.3        Anwendungen — 334

23.3.1	Lebensmittelanalytik (Food Screening) —	<b>334</b>
23.3.2	Strömungsmesstechnik (MRV) —	<b>335</b>
23.3.3	Festkörperanalytik (MAS) —	<b>336</b>
23.3.4	Medizinische Diagnostik (MRT) —	<b>338</b>
23.4	Kommerzielle Produkte —	<b>339</b>
23.5	Zusammenfassung —	<b>341</b>
<b>24</b>	<b>Raman-Spektrometrie —</b>	<b>343</b>
24.1	Einleitung —	<b>343</b>
24.2	Messprinzip —	<b>344</b>
24.2.1	Streuung —	<b>344</b>
24.2.2	Raman-Streuung —	<b>346</b>
24.2.3	Raman-Aktivität —	<b>348</b>
24.2.4	Raman-Spektrogramm —	<b>350</b>
24.2.5	Raman-Spektrometer —	<b>351</b>
24.3	Anwendungen —	<b>352</b>
24.4	Kommerzielle Produkte —	<b>353</b>
24.4.1	Metrohm/B&W Tek —	<b>353</b>
24.4.2	Bruker Optik —	<b>356</b>
24.4.3	Anton Paar —	<b>357</b>
24.5	Zusammenfassung —	<b>358</b>

## **Teil IV: Chemische Sensorik**

<b>25</b>	<b>Wärmetönungssensoren —</b>	<b>363</b>
25.1	Einleitung —	<b>363</b>
25.2	Messprinzip —	<b>364</b>
25.2.1	Funktion und Aufbau des Sensors —	<b>364</b>
25.2.2	Katalytische Verbrennung —	<b>369</b>
25.2.3	Einflüsse durch Umgebungsbedingungen —	<b>371</b>
25.3	Anwendungen —	<b>371</b>
25.4	Kommerzielle Produkte —	<b>374</b>
25.5	Zusammenfassung —	<b>375</b>
<b>26</b>	<b>Kinetische Analyse —</b>	<b>377</b>
26.1	Einleitung —	<b>377</b>
26.2	Messprinzip —	<b>377</b>
26.2.1	Chemische Grundlagen —	<b>378</b>
26.2.2	Einflussfaktoren —	<b>382</b>
26.2.3	Verfahren zur Messung der zeitabhängigen Konzentration —	<b>384</b>
26.3	Anwendungen —	<b>384</b>

- 26.4 Kommerzielle Produkte — 386
- 26.5 Zusammenfassung — 390
  
- 27 Prüfröhrchen — 391**
  - 27.1 Einleitung — 391
  - 27.2 Messprinzip — 392
    - 27.2.1 Chemische Reaktionen — 392
    - 27.2.2 Aufbau und Gebrauch — 395
  - 27.3 Anwendungen — 397
    - 27.3.1 Untersuchung medizinischer Gase — 399
    - 27.3.2 Messung von Isocyanaten und Aldehyden am Arbeitsplatz — 399
    - 27.3.3 Überprüfung von Luftströmungen — 400
  - 27.4 Kommerzielle Produkte — 401
    - 27.4.1 Herkömmliche Prüfröhrchen — 401
    - 27.4.2 Simultantestsets — 402
    - 27.4.3 Chipmesssysteme — 403
  - 27.5 Zusammenfassung — 404
  
- 28 Titrimetrie/Volumetrie — 405**
  - 28.1 Einleitung — 405
  - 28.2 Messprinzip — 406
    - 28.2.1 Chemische Grundlagen — 406
    - 28.2.2 Experimenteller Aufbau und Durchführung — 408
    - 28.2.3 Titrationsverlauf — 409
    - 28.2.4 Visuelle Endpunkterkennung — 410
    - 28.2.5 Instrumentelle Endpunkterkennung — 412
    - 28.2.6 Titrationsarten — 414
  - 28.3 Anwendungen — 415
  - 28.4 Kommerzielle Produkte — 419
    - 28.4.1 Manuelle Titration — 419
    - 28.4.2 Automatische Titration — 420
  - 28.5 Zusammenfassung — 422
  
- 29 Chemische Gravimetrie — 425**
  - 29.1 Einleitung — 425
  - 29.2 Messprinzip — 426
    - 29.2.1 Grundlagen der Fällungsreaktionen — 426
    - 29.2.2 Fällungsanalyse — 429
    - 29.2.3 Einflussgrößen und Störfaktoren der gravimetrischen Fällungsanalyse — 431
    - 29.2.4 Grundlagen der Wägung — 432
  - 29.3 Anwendungen — 434

- 29.4 Kommerzielle Produkte — 436
- 29.5 Zusammenfassung — 436

## **Teil V: Elektrochemische Sensorik**

- 30 Coulometrie — 439**
  - 30.1 Einleitung — 439
  - 30.2 Messprinzip — 439
    - 30.2.1 Elektrolyse — 440
    - 30.2.2 Physikalische Grundlagen — 441
    - 30.2.3 Coulometrische Bestimmung — 442
    - 30.2.4 Potenziostatische Coulometrie — 443
    - 30.2.5 Galvanostatische Coulometrie — 445
  - 30.3 Anwendung — 447
    - 30.3.1 Bestimmung von Kohlenstoff in Metallen — 447
    - 30.3.2 Bestimmung des Wassergehaltes — 448
    - 30.3.3 Weitere Anwendungen — 449
  - 30.4 Kommerzielle Produkte — 450
    - 30.4.1 Metrohm-Coulometer — 450
    - 30.4.2 Indikationsmethoden — 451.
    - 30.4.3 Metrohm-Coulometriezubehör — 452
  - 30.5 Zusammenfassung — 453
  
- 31 Konduktometrie — 455**
  - 31.1 Einleitung — 455
  - 31.2 Messprinzip — 456
    - 31.2.1 Physikalische Grundlagen — 456
    - 31.2.2 Leitfähigkeit elektrolytischer Lösungen — 456
    - 31.2.3 Konduktometrische Messung — 457
    - 31.2.4 Konduktometrische Messzelle — 459
  - 31.3 Anwendung — 461
    - 31.3.1 Prozesskontrolle — 462
    - 31.3.2 Lebensmitteltechnik — 462
    - 31.3.3 Medizintechnik — 463
    - 31.3.4 Gasanalyse — 463
  - 31.4 Kommerzielle Produkte — 465
  - 31.5 Zusammenfassung — 466
  
- 32 Voltammetrie/Polarografie — 469**
  - 32.1 Einleitung — 469
  - 32.2 Messprinzip — 470

- 32.2.1 Physikalische Grundlagen — 470
- 32.2.2 Experimenteller Aufbau — 471
- 32.2.3 Durchführung einer Analyse — 472
- 32.2.4 Methoden — 473
- 32.3 Anwendungen — 475
- 32.3.1 Spurenanalyse von Metallionen — 476
- 32.3.2 Andere Anwendungen — 476
- 32.4 Kommerzielle Produkte — 477
- 32.4.1 Stationäres Voltammeter — 477
- 32.4.2 Mobiles Voltammeter — 479
- 32.5 Zusammenfassung — 480
  
- 33 Elektrogravimetrie — 483**
- 33.1 Einleitung — 483
- 33.2 Messprinzip — 484
- 33.2.1 Chemische und physikalische Grundlagen — 485
- 33.2.2 Experimenteller Aufbau — 491
- 33.2.3 Versuchsdurchführung — 493
- 33.3 Anwendungen — 496
- 33.4 Kommerzielle Produkte — 497
- 33.5 Zusammenfassung — 499
  
- 34 Festelektrolytsensoren — 501**
- 34.1 Einleitung — 501
- 34.2 Messprinzip — 501
- 34.2.1 Chemische Konzentrationszelle — 502
- 34.2.2 Festelektrolytsensor — 504
- 34.2.3 Potenziometrisches Messverfahren — 505
- 34.2.4 Amperometrisches Verfahren — 508
- 34.2.5 Kombisensorverfahren — 509
- 34.2.6 Nichtnernstsche Sensoren — 511
- 34.3 Anwendungen — 512
- 34.3.1 Lambdaregelung — 512
- 34.3.2 Stickoxidmessung — 513
- 34.3.3 Schwefeldioxidmessung — 514
- 34.3.4 Kohlendioxidmessung — 514
- 34.4 Kommerzielle Produkte — 515
- 34.5 Zusammenfassung — 516

**Literatur — 519**

**Stichwortverzeichnis — 545**