Peter Gründler

# Chemische Sensoren

## Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Ingenieure

Mit 184 Abbildungen und 27 Tabellen

Springer

# Inhalt


**1 Einleitung** ..... 1

1.1 Sensoren und Sensorik ..... 1
1.1.1 Sensoren als technische Sinnesorgane ..... 1
1.1.2 Der Begriff Sensor ..... 3
1.2 Chemische Sensoren ..... 4
1.2.1 Was sind chemische Sensoren? ..... 4
1.2.2 Elemente chemischer Sensoren ..... 7
Rezeptor ..... 8
Transduktor ..... 9
1.2.3 Charakterisierung chemischer Sensoren ..... 12
Bewertung von Analysenergebnissen ..... 12
Kenngrößen von chemischen Sensoren ..... 13
1.3 Literatur ..... 14

**2 Grundlagen** ..... 15

2.1 Sensor-Physik ..... 15
2.1.1 Festkörper ..... 15
Das Bändermodell des Festkörpers ..... 16
Gitterdefekte, Ionenleitung, Hopping ..... 18
Sperrschichten ..... 20
Strukturen ..... 23
2.1.2 Optik und Spektroskopie ..... 25
Wechselwirkung Strahlung und Materie ..... 25
Reflexion und Brechung ..... 29
Absorption, Photolumineszenz und Chemilumineszenz ..... 30
2.1.3 Piezoelektrizität und Pyroelektrizität ..... 36
2.2 Sensor-Chemie ..... 38
2.2.1 Chemisches Gleichgewicht ..... 37
2.2.2 Kinetik und Katalyse ..... 40
2.2.3 Elektrolytlösungen ..... 41
2.2.4 Säuren und Basen, Fällungen und Komplexe ..... 42
Säuren und Basen ..... 42
Fällungs- und Komplexbildungsreaktionen ..... 46
2.2.5 Redoxgleichgewichte ..... 49
2.2.6 Elektrochemie ..... 52

Elektroden im Gleichgewicht ... 52
Elektrolyseprozesse ... 55
2.2.7 Chemische Wechselwirkungen: Ionenaustausch; Extraktion; Adsorption ... 72
Ionenaustausch ... 73
Extraktion ... 75
Adsorption ... 77
2.2.8 Besonderheiten biochemischer Reaktionen ... 78
Enzymatische Reaktionen ... 79
Immunologische Reaktionen ... 80
Reaktionen mit Nucleinsäuren ... 82
2.3 Sensor-Technologien ... 83
2.3.1 Dickschichttechnik ... 84
2.3.2 Dünnfilmtechnologie und Strukturierungstechniken ... 85
2.3.3 Oberflächenmodifizierung und geordnete Monoschichten ... 88
Oberflächenmodifizierung ... 88
Selbstorganisierende Monolagen (Self Assembled Monolayers; SAM) ... 94
Langmuir-Blodgett-Filme (LBL) ... 96
2.3.4 Mikrosystem-Technologien ... 98
Integrierte Elektronik ... 99
Integrierte Optik ... 100
2.4 Sensor-Messtechnik ... 101
2.4.1 Elementare Sensor-Elektronik ... 101
2.4.2 Elektrische Meßinstrumente ... 106
2.4.3 Optische Meßinstrumente ... 107
Spektrometer ... 107
Interferometer und Fourier-Transform-Spektrometer ... 114
2.5 Literatur ... 116

**3 Strukturierte Halbleiter als chemische Sensoren** ... 117

Literatur zu Kapitel 3 ... 119

**4 Massenempfindliche Sensoren** ... 121

4.1 BAW-Sensoren ... 122
4.2 SAW-Sensoren ... 124

**5 Leitfähigkeits- und Kapazitätssensoren** ... 127

5.1 Konduktometrische Sensoren ... 128
5.2 Resistive und kapazitive Sensoren für Gase ... 130
5.2.1 Gassensoren mit polykristallinen Halbleitern ... 130
5.2.2 Gassensoren mit Polymeren und Gelen ... 134
5.3 Resistive und kapazitive Sensoren für Flüssigkeiten ... 135
5.4 Literatur ... 137

**6 Thermometrische und kalorimetrische Sensoren** ... 139

6.1 Sensoren mit Thermistoren und Pellistoren ... 139
6.2 Pyroelektrische Sensoren ... 141
6.3 Sensoren auf der Basis anderer thermischer Effekte ... 142
6.4 Literatur ... 142

**7 Elektrochemische Sensoren** ... 143

7.1 Potentiometrische Sensoren ... 144
7.1.1 Selektivität potentiometrischer Sensoren ... 147
7.1.2 Ionenselektive Elektroden (ISE) ... 147
Potentiometrische Sensoren mit Festkörpermembran ... 148
Potentiometrische Sensoren mit Flüssigmembran ... 153
Die Glaselektrode ... 159
Die Lambda-Sonde ... 162
7.1.3 Der ionenselektive Feldeffekttransistor (ISFET) ... 165
7.1.4 Messungen mit potentiometrischen Sensoren ... 168
Meßgeräte ... 168
Experimentelle Bedingungen ... 169
Kalibrierung ... 170
Bestimmung des Selektivitätskoeffizienten ... 173
7.2 Amperometrische Sensoren ... 173
7.2.1 Selektivität amperometrischer Sensoren ... 174
7.2.2 Bauformen und Beispiele ... 176
7.2.3 Messungen mit amperometrischen Sensoren ... 181
7.3 Sensoren auf der Basis anderer elektrochemischer Meßmethoden ... 182
7.4 Elektrochemische Biosensoren ... 183
7.4.1 Grundlagen ... 183
Biologische Erkennung als Selektivitätsprinzip ... 183
Immobilisierung bioaktiver Substanzen ... 183
7.4.2 Arten elektrochemischer Biosensoren ... 187
Enzymsensoren ... 187
Immunosensoren ... 195
Sensoren mit ganzen Zellen, Mikroorganismen und Organteilen ... 197
Nucleinsäure-Sensoren ... 199
7.5 Literatur ... 205

**8 Optische Sensoren** ... 207

8.1 Lichtleiter als Basis optischer Sensoren ... 207
8.2 Fasersensoren ohne chemischen Rezeptor (Mediator) ... 210
8.3 Optoden: Fasersensoren mit chemischem Rezeptor ... 217
8.3.1 Übersicht ... 213
8.3.2 Optoden mit einfachen Rezeptorschichten ... 217

8.3.3 Optoden mit komplexen Rezeptorschichten ... 220
8.4 Sensoren mit planaren optischen Transduktoren ... 221
8.4.1 Planare Wellenleiter ... 221
8.4.2 Oberflächenplasmonenresonanz und Resonanzspiegel-Prismenkoppler ... 223
8.5 Optische Biosensoren ... 224
8.5.1 Grundlagen ... 224
8.5.2 Optische Enzymsenoren ... 225
8.5.3 Optische Bioaffinitätssensoren ... 227
8.5.4 Optische DNA-Sensoren ... 230
8.6 Sensorsysteme mit Integrierter Optik ... 233
8.7 Literatur ... 234

**9 Chemische Sensoren als Detektoren und Indikatoren** ... 237

9.1 Indikatoren für Titrationsprozesse ... 238
9.2 Durchflußdetektoren für kontinuierliche Analysatoren und für Trennmethoden ... 239
9.2.1 Kontinuierliche Analysatoren ... 240
9.2.2 Trennmethoden ... 245
Chromatographie ... 247
Kapillarelektrophorese ... 248
9.3 Literatur ... 250

**10 Sensor-Arrays und miniaturisierte Totalanalysatoren** ... 251

10.1 Zwei Entwicklungsrichtungen und ihre Ursachen ... 251
10.2 Intelligente Sensoren und Sensor-Arrays ... 252
10.2.1 Intelligenz in Sensorsystemen ... 252
Warum Intelligenz? ... 252
Selbst-Test, Selbst-Diagnose und Selbst-Kalibrierung ... 252
10.2.2 Sensor-Arrays ... 255
Warum Sensor-Arrays? ... 255
Mehrdimensionale und Mehrkomponenten-Analyse ... 256
Elektronische Nasen, elektronische Zungen (ENoses; ETongues) ... 258
10.3 Miniaturisierte Totalanalysatoren ... 264
10.3.1 Entstehungsgeschichte ... 264
Vorläufer ... 265
μ-TAS und Lab-on-a-Chip ... 267
10.3.2 Technologien ... 268
10.3.3 Charakteristische Operationen und Prozesse in Mikro-Total-Analysatoren ... 270
Elektroosmose in Mikrokanälen ... 270
Probenahme und Probenvorbehandlung ... 270
Probeninjektion und Detektion ... 272

10.3.4 Beispiele für μ-TAS ..... 273
Kapillar-Elektrophorese ..... 273
Titrationsvorrichtungen ..... 274
10.4 Literatur ..... 275

**Stichwortverzeichnis** ..... 277