

## Inhaltsverzeichnis

**Geleitwort** *XI*

**Vorwort** *XIII*

**Akronyme, Begriffe und Definitionen** *XV*

- 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung** *1*  
Weiterführende Literatur *22*
- 2 Elektrochemische Prozesse und Systeme** *23*
- 2.1 Parasitäre Reaktionen *32*
- 2.2 Selbstentladung *33*
- 2.3 Systemverschlechterung *36*
- 2.3.1 Alterung *40*  
Weiterführende Literatur *42*
- 3 Thermodynamik elektrochemischer Systeme** *45*  
Weiterführende Literatur *61*
- 4 Kinetik elektrochemischer Energieumwandlungsprozesse** *63*
- 4.1 Schritte von Elektrodenreaktionen und Überpotentialen *64*
- 4.2 Transport *64*
- 4.3 Ladungsdurchtritt *66*
- 4.4 Überpotentiale *68*  
Weiterführende Literatur *78*
- 5 Elektroden und Elektrolyte** *81*
- 5.1 Recycling *95*  
Weiterführende Literatur *96*
- 6 Experimentelle Methoden** *99*
- 6.1 Batterietester *99*
- 6.2 Strom-Potential-Messungen *100*
- 6.3 Lade-/Entlademessungen *104*
- 6.4 Batterieladung *113*

6.5	Einfache und zyklische Voltammetrie	120
6.6	Impedanzmessungen	124
6.7	Galvanostatische Titration	131
6.8	Potentiostatische Titration	132
6.9	Elektrochemische Potentialsprungspektroskopie	133
6.10	Elektrochemische Quarzmikrowaage	134
6.11	Nichtelektrochemische Methoden	134
6.11.1	Festkörper-Kernresonanzspektroskopie	135
6.11.2	Gasadsorptionsmessungen	135
6.11.3	Mikroskopien	135
6.11.4	Thermische Messungen	135
6.11.5	Modellierung	136
	Weiterführende Literatur	140
<b>7</b>	<b>Primärsysteme</b>	<b>141</b>
7.1	Wäßrige Systeme	143
7.1.1	Zink-Kohle-Batterie	143
7.1.2	Alkalische Zn/MnO <sub>2</sub> -Batterie	145
7.1.3	Zn/HgO-Batterien	149
7.1.4	Zn/AgO-Batterie	150
7.1.5	Cd/AgO-Batterien	153
7.1.6	Mg/MnO <sub>2</sub> -Batterien	155
7.2	Nichtwäßrige Systeme	156
7.2.1	Lithiumprimärbatterien	157
7.2.2	Li/MnO <sub>2</sub>	159
7.2.3	Li/Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	160
7.2.4	Li/CuO	161
7.2.5	Li/V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Li/Ag <sub>2</sub> V <sub>4</sub> O <sub>11</sub> und Li/CSVO	162
7.2.6	Li/CuS	163
7.2.7	Li/FeS <sub>2</sub>	164
7.2.8	Li/CF <sub>x</sub> -Primärbatterien	165
7.2.9	Li/I <sub>2</sub>	167
7.2.10	Li/SO <sub>2</sub>	167
7.2.11	Li/SOCl <sub>2</sub>	169
7.2.12	Li/SO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	172
7.2.13	Li/Oxyhalid-Primärbatterien	172
7.3	Metall-Luft-Systeme	173
7.3.1	Wäßrige Metall-Luft-Primärbatterien	173
7.3.2	Nichtwäßrige Metall-Luft-Batterien	185
7.4	Füllzellen	187
7.4.1	Seewasseraktivierbare Batterien	187
7.4.2	Aktivierbare Hochleistungsbatterien	189
	Weiterführende Literatur	190

<b>8</b>	<b>Sekundärssysteme</b>	<b>191</b>
8.1	Wäßrige Systeme	193
8.1.1	Blei-Säure-Akkumulator	193
8.1.2	Sekundärbatterien auf Nickelbasis	207
8.1.3	Wäßrige wiederaufladbare Lithiumbatterien	221
8.1.4	Wäßrige wiederaufladbare Natriumbatterien	227
8.2	Nichtwäßrige Systeme	228
8.2.1	Lithium-Ionen-Batterien	228
8.2.2	Wiederaufladbare Li/S-Batterien	252
8.2.3	Wiederaufladbare Na/S-Batterien	255
8.2.4	Wiederaufladbare Li/Se-Batterien	257
8.2.5	Wiederaufladbare Mg-Batterien	257
8.3	Sekundärbatterien auf Basis von Gelpolymerelektrolyten	259
8.3.1	Gel-Lithium-Ionen-Batterien	260
8.3.2	Gelelektrolyte für Natriumbatterien	261
8.4	Sekundärbatterien auf Festelektrolytbasis	262
8.4.1	Feste Lithium-Ionen-Batterien	263
8.4.2	Wiederaufladbare feste Lithiumbatterien	264
8.5	Wiederaufladbare Metall-Luft-Batterien	265
8.5.1	Wiederaufladbare Li/Luft-Batterien	265
8.5.2	Wiederaufladbare Na/Luft-Batterien	268
8.5.3	Wiederaufladbare Zn/Luft-Batterien	269
8.6	Hochtemperatursysteme	271
8.6.1	Natrium-Schwefel-Batterie	271
8.6.2	Natrium-Nickelchlorid-Batterie	274
8.6.3	Flüssigmetallakkumulatoren	279
	Weiterführende Literatur	279
<b>9</b>	<b>Brennstoffzellen</b>	<b>281</b>
9.1	Die Sauerstoffelektrode	286
9.2	Die Wasserstoffelektrode	292
9.3	Gemeinsamkeiten von Brennstoffzellen	293
9.4	Klassifizierung von Brennstoffzellen	297
9.4.1	Brennstoffzellen bei Umgebungstemperatur	298
9.4.2	Alkalische Brennstoffzellen	298
9.4.3	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFCs)	300
9.4.4	Direkte Alkoholbrennstoffzellen	307
9.4.5	Bioelektrochemische Brennstoffzellen	309
9.4.6	Mitteltemperaturbrennstoffzellen	310
9.4.7	Phosphorsäurebrennstoffzellen	310
9.4.8	Schmelzcarbonatbrennstoffzellen	311
9.4.9	Hochtemperaturbrennstoffzellen	313
9.5	Anwendungen von Brennstoffzellen	314
9.6	Brennstoffzellen in Energiespeichersystemen	315
	Weiterführende Literatur	317

<b>10</b>	<b>Redoxbatterien</b>	<b>319</b>
10.1	Das Eisen-Chrom-System	324
10.2	Das Eisen-Vanadium-System	325
10.3	Das Eisen-Cadmium-System	326
10.4	Das Brom-Polysulfid-System	326
10.5	Das All-Vanadium-System	327
10.6	Das Vanadium-Brom-System	328
10.7	Actiniden-RFB	329
10.8	All-Organische RFBs	330
10.9	Nichtwässrige RFBs	330
10.10	Hybride Systeme	330
10.11	Das Zink-Cer-System	330
10.12	Das Zink-Brom-System	331
10.13	Das Zink/Organisch-System	332
10.14	Das Cadmium/Organisch-System	332
10.15	Das Blei-Bleioxid-System	333
10.16	Das Cadmium-Bleioxid-System	334
10.17	Das All-Kupfer-System	334
10.18	Das Zink-Nickel-System	334
10.19	Das Lithium-LiFePO <sub>4</sub> -System	335
10.20	Vanadium-Festsalz-Batterie	335
10.21	Vanadium-Sauerstoff-System	336
10.22	Elektrochemischer Flußkondensator	337
10.23	Entwicklungsstand und Perspektiven	337
	Weiterführende Literatur	339
<b>11</b>	<b>Superkondensatoren</b>	<b>341</b>
11.1	Klassifizierung von Superkondensatoren	342
11.2	Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren	344
11.2.1	Elektrolyte für EDLCs	345
11.2.2	Elektrodenmaterialien für EDLCs	346
11.2.3	Elektrochemische Leistung von EDLCs	354
11.3	Pseudokondensatoren	356
11.3.1	RuO <sub>2</sub>	356
11.3.2	MnO <sub>2</sub>	359
11.3.3	Intrinsisch leitfähige Polymere	365
11.3.4	Redoxsysteme	373
11.3.5	Elektrochemische Leistung von Pseudokondensatoren	376
11.4	Hybridkondensatoren	380
11.4.1	Negative Elektrodenmaterialien	380
11.4.2	Positive Elektrodenmaterialien	389
11.4.3	Elektrochemische Leistung von Hybridkondensatoren	402
11.5	Testen von Superkondensatoren	408
11.6	Kommerziell erhältliche Superkondensatoren	408
11.7	Anwendung von Superkondensatoren	409

- 11.7.1 Unterbrechungsfreie Stromversorgung 410
- 11.7.2 Transport 411
- 11.7.3 Intelligente Netze 411
- 11.7.4 Militärische Ausrüstung 412
- 11.7.5 Andere zivile Anwendungen 413
- Weiterführende Literatur 414

**A Anhang 415**

**Stichwortverzeichnis 419**