

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *V*

Symbolverzeichnis *XXIII*

- 1 Einführung** *1*
 - 1.1 Energieversorgung allgemein *1*
 - 1.2 Elektrochemische und nicht-elektrochemische
Energiespeichertechnologien *3*
 - 1.3 Grundlegende Eigenschaften von Batterien, Gemeinsamkeiten
und Unterschiede *5*
 - 1.4 Überbrückungszeit *7*
 - 1.5 Vergleich von Batterietechnologien *9*
 - 1.6 Anwendungen und Einordnung von Batterien in Gesamtsysteme *10*
 - Literatur *12*
 - Aufgaben *12*

- 2 Elektrochemische Grundlagen** *15*
 - 2.1 Elektrochemische Grundbegriffe *16*
 - 2.1.1 Einige Definitionen *16*
 - 2.1.2 Spannung und Ladungsträgerverteilung *17*
 - 2.1.3 Die spannungsbildenden Reaktionen – Hauptreaktionen *18*
 - 2.1.4 Doppelschichtkondensator und Austauschstromdichte *20*
 - 2.1.5 Faradaysche Zahl *21*
 - 2.1.6 Theoretische spezifische Kapazität von Elektroden oder Zellen *21*
 - 2.2 Elektrochemische Thermodynamik *22*
 - 2.2.1 Energiebilanz und Gleichgewichtsspannung *22*
 - 2.2.2 Konzentrationsabhängigkeit der Gleichgewichtsspannung
(Nernst-Spannung) *23*
 - 2.2.3 Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtsspannung *24*
 - 2.2.4 Entropieterm und Wärmetönung – reversible Wärme *24*
 - 2.2.5 Elektrochemische Spannungsreihe *24*
 - 2.2.6 Grenzen thermodynamischer Betrachtungen *25*
 - 2.2.7 Theoretische spezifische Energie *26*

x | *Inhaltsverzeichnis*

- 2.2.8 Referenzelektrode 26
- 2.3 Elektrochemische Kinetik 27
 - 2.3.1 Überspannungsarten 27
 - 2.3.2 Ladungsträgerdurchtrittsspannung 28
 - 2.3.3 Butler-Volmer-Gleichung 28
 - 2.3.4 Abhängigkeit der BV-Gleichung von wichtigen Systemparametern 33
 - 2.3.5 Widerstandsverluste bei der Stromleitung – ohmsche Erwärmung 37
 - 2.3.6 Auswirkungen der Temperatur 37
 - 2.3.7 U-I-Kennlinie von elektrochemischen Systemen 40
- 2.4 Ersatzschaltbilder 41
 - 2.4.1 Grundlagen elektrochemischer Ersatzschaltbilder 41
 - 2.4.2 Grundlegende Ersatzschaltbilder einer Elektrode und einer Zelle 42
 - 2.4.3 Ersatzschaltbild bei konstantem Strom 44
- 2.5 Nebenreaktionen 45
 - Literatur 47
 - Aufgaben 47
- 3 Laden und Entladen von Zellen und Batterien 51**
 - 3.1 Begriffsbestimmungen Kapazität und Innenwiderstand 52
 - 3.1.1 Kapazität 52
 - 3.1.2 Innenwiderstand 54
 - 3.2 Begriffsbestimmung Laden und Entladen von Batterien 54
 - 3.2.1 Entladen 55
 - 3.2.2 Laden 55
 - 3.2.3 Ladefaktor und Wirkungsgrad 58
 - 3.3 Entladen und Laden von Elektroden einer Zelle 59
 - 3.3.1 Bedeutung der BV-Gleichung für den Verlauf von Strom und Spannung 59
 - 3.3.2 Entladen und Laden mit konstantem Strom 61
 - 3.3.3 Laden mit konstantem Strom 62
 - 3.3.4 Strom- und Spannungsverlauf von Batterien 64
 - 3.4 Reihenschaltung von Elektrodenwechselwirkungen von Elektroden aufeinander 65
 - 3.5 Entladen und Laden von Elektroden in einer Zelle 66
 - 3.5.1 Bedeutung von Nebenreaktionen bei Reihenschaltung 67
 - 3.5.2 Entladen von Zellen ohne Nebenreaktionen in Reihenschaltung 68
 - 3.5.3 Entladen von Zellen mit Nebenreaktionen in Reihenschaltung 69
 - 3.5.4 Laden von Zellen mit Nebenreaktionen in Reihenschaltung 72
 - 3.5.5 Laden von Zellen ohne Nebenreaktionen in Reihe 75
 - 3.6 Auswirkungen eines Kurzschlusses einer Zelle bei Reihenschaltung 76
 - 3.7 Fehlerpropagation, parallele Batteriestränge und Weiteres 77
 - Literatur 77
 - Aufgaben 77

4	Aufbau von Elektroden, Zellen und kompletten Batteriesystemen	81
4.1	Elektrochemische Anforderungen an die Struktur von Aktivmassen	82
4.1.1	Allgemeine Anforderungen	82
4.1.2	Verfügbarkeit von Reaktanten	84
4.1.3	Ionische und elektronische Leitfähigkeit von Elektroden und Zellen	85
4.1.4	Mechanische Beanspruchung der Elektroden	86
4.2	Aufbau von Zellen	87
4.2.1	Allgemeine Hinweise	87
4.2.2	Bipolarplattenaufbau	88
4.2.3	Stapelzellen und gewickelte Zellen	88
4.3	Kombinierte Ionen- und Elektronenleitfähigkeit der Elektroden	94
4.4	Zellgehäuse und Batteriesysteme	95
4.4.1	Allgemeine Anforderungen	95
4.4.2	Spezifische Energie von Zellen, Modulen und Batteriesystemen	96
	Literatur	97
	Aufgaben	97
5	Thermische Eigenschaften von Zellen und Batterien	99
5.1	Inhomogene Wärmekapazität und anisotrope Wärmeleitung	100
5.2	Wärmequellendichte	101
5.2.1	Wärmequellen	101
5.2.2	Widerstandsverluste bei der Stromleitung – ohmsche Erwärmung	102
5.2.3	Ladungsträgerdurchtritt	103
5.2.4	Reversible Wärme der Reaktion	104
5.2.5	Chemische Reaktionen	105
5.2.6	Vergleich der Wärmeerzeugungsterme	105
5.3	Wärmeaustausch mit der Umgebung	106
5.3.1	Wärmeleitung	106
5.3.2	Konvektion	107
5.3.3	Strahlung	107
5.4	Wärmebilanz	107
5.5	Temperatúrauswirkungen	108
5.6	Bestimmung thermischer Kenngrößen	110
	Literatur	110
	Aufgabe	110
6	Alterungseigenschaften von Batterien und Zellen	111
6.1	Klassifikation von Alterungsprozessen	112
6.2	Lebensdauer	113
6.2.1	Definition Lebensdauerende	113
6.2.2	Bestimmung des Lebensdauerendes	116
6.2.3	Veränderungen der Eigenschaften während der Nutzung	117
6.3	Grenzen der Lebensdauer	119
6.3.1	Grundsätzliche Begrenzung der Lebensdauer	119
6.3.2	Herstellerangaben über die zu erwartende Lebensdauer	119

XII | *Inhaltsverzeichnis*

- 6.4 Verfahren zur Lebensdauerprognose 120
 - 6.4.1 Gewichtete Amperestundendurchsatzverfahren 120
 - 6.4.2 Ereignisbasierte Lebensdauerprognoseverfahren 121
 - 6.4.3 Prognose des Kapazitäts- und Innenwiderstandsverlaufs 122
 - Literatur 123
 - Aufgaben 124

- 7 Zustandsbestimmung von Zellen und Batterien 125**
 - 7.1 Motivation 126
 - 7.2 Ladezustand und Entladetiefe 127
 - 7.2.1 Strenge Definition des Ladezustands 127
 - 7.2.2 Hauptreaktionsstrom 128
 - 7.2.3 Messung des Batteriestroms 129
 - 7.2.4 Yazami-Theorem 131
 - 7.2.5 Experimentelle Bestimmung des Ladezustands 131
 - 7.2.6 Entladetiefe 132
 - 7.2.7 State of energy 132
 - 7.3 State of health und state of function 133
 - 7.3.1 Begriffe 133
 - 7.3.2 Abgrenzung und Diskussion der Begriffe state of function und state of health 133
 - 7.3.3 Messung von *SoH* und *SoF* 135
 - 7.4 State of safety 136
 - Literatur 136
 - Aufgabe 137

- 8 Batteriemodelle 139**
 - 8.1 Klassifikation, Einsatz und Grenzen von Modellen 139
 - 8.1.1 Zum Begriff des Batteriemodells 139
 - 8.1.2 Nutzung von Modellen 140
 - 8.1.3 Einsatzgrenzen 141
 - 8.2 Ersatzschaltbildmodelle 141
 - 8.2.1 Grundsätzliches 141
 - 8.2.2 Aufbau von Ersatzschaltbildmodellen 142
 - 8.2.3 Elektrolytkondensatoreigenschaften einer Batterie 144
 - 8.2.4 Berücksichtigung von zeitlichen Prozessen, Massentransport und Temperatur 145
 - 8.2.5 Örtlich aufgelöste Ersatzschaltbildmodelle 145
 - 8.2.6 Relaxationsprozesse 146
 - 8.3 Modelle mit ladezustandsunabhängigen Parametern: das Shepherd-Modell 147
 - 8.4 Modelle mit ladezustandsabhängigen Parametern 149
 - 8.4.1 Thévenet-Modell 149
 - 8.4.2 Randles-Modell 149
 - 8.5 Ablauf von Simulationen 150

- 8.6 Vergleich von Modellen 152
- 8.7 Modellbildung bei größeren Systemen 152
 - Literatur 154
 - Aufgaben 154

- 9 Parameterbestimmung 155**
 - 9.1 Begriffsbestimmung 155
 - 9.2 Bestimmung durch physikochemische Methoden 156
 - 9.2.1 Experimentelle Bestimmung 156
 - 9.2.2 Kapazitätsbestimmung 158
 - 9.2.3 Temperatur- und Stromabhängigkeit der Kapazität 158
 - 9.2.4 Kältekapazität und Kälteprüfstrom 159
 - 9.2.5 Überbrückungszeiten mit konstanter Leistung 159
 - 9.3 Ruhespannungskurve 160
 - 9.4 Innenwiderstandsbestimmung mit Strom- bzw. Spannungspulsen 160
 - 9.5 Kurzschlussstrom 163
 - 9.6 Parametrisierung für das Randles-Modell aus Pulsbelastungen (Messung im Zeitbereich) 164
 - 9.7 Parameterbestimmung durch Messung des Impedanzspektrums (Messung im Frequenzbereich) 164
 - 9.8 Messung des Wechselstrominnenwiderstands 166
 - 9.9 Parametrisierung des Randles-Modells über alle Betriebszustände 167
 - Literatur 168
 - Aufgaben 169

- 10 Batterieanalytik 171**
 - 10.1 Methodenüberblick 171
 - 10.2 Bewertung der Veränderungen elektrischer Kenngrößen 172
 - 10.3 Elektrochemische Analyseverfahren 173
 - 10.3.1 Stationäre elektrochemische Analyseverfahren 174
 - 10.3.2 Quasistationäre elektrochemische Analyseverfahren 174
 - 10.3.3 Nicht-stationäre Verfahren 176
 - 10.4 Chemische und spektroskopische Verfahren – Post-mortem-Analyseverfahren 178
 - 10.4.1 Allgemeines 178
 - 10.4.2 Chemische Techniken inkl. Trennverfahren und Charakterisierungsverfahren für Oberflächen und Korngrößen 178
 - 10.4.3 Mikroskopische Techniken 179
 - 10.4.4 Spektroskopische Techniken 181
 - 10.4.5 Diffraktometrische Techniken 183
 - 10.5 In-situ-Analyseverfahren 184
 - 10.6 Zusammenfassung 185
 - Literatur 185
 - Aufgaben 186

XIV | *Inhaltsverzeichnis*

- 11 Übersicht über Batteriesysteme 187**
 - 11.1 Physikochemische Daten und Charakteristika 187
 - 11.2 Investitions- und Betriebskosten 191
 - 11.3 Marktstruktur 192
 - 11.4 Verfügbarkeit von Informationen 192
 - 11.5 Normungsdichte 193
 - Weiterführende Literatur 194

- 12 Blei-Säure-Batterien 195**
 - 12.1 Einführung und wirtschaftliche Bedeutung 196
 - 12.2 Elektrochemie 196
 - 12.2.1 Übersicht über aktive Komponenten 197
 - 12.2.2 Übersicht über die wichtigsten Reaktionen an der positiven und negativen Elektrode 198
 - 12.2.3 Beschreibung der Hauptreaktionen 200
 - 12.2.4 Überentladereaktionen beim Entladen 201
 - 12.2.5 Nebenreaktionen der positiven und negativen Elektrode beim Überladen 203
 - 12.2.6 Nebenreaktionen und Selbstentladung im Ruhezustand 205
 - 12.2.7 Laden und Entladen von Zellen in Reihe 206
 - 12.3 Weitere elektrochemische Reaktionen 207
 - 12.3.1 Batterien mit internem Sauerstoffkreislauf (verschlossene Batterien, VRLA) 208
 - 12.3.2 Elektrochemie 208
 - 12.4 Aktivmaterialien 213
 - 12.4.1 Elektrische Leitfähigkeit der Aktivmassen 214
 - 12.4.2 Effektive Oberfläche und Mikrostruktur der Aktivmassen 216
 - 12.4.3 Bleisulfat 217
 - 12.4.4 Spannungssack zu Beginn der Entladung 218
 - 12.4.5 Herstellungsverfahren 220
 - 12.5 Elektrolyt 220
 - 12.6 Stromkollektoren, Gitter 222
 - 12.6.1 Korrosionsbeständigkeit 224
 - 12.6.2 Elektrischer Widerstand 224
 - 12.6.3 Mechanische Stabilität 225
 - 12.6.4 Elektrischer Kontakt zwischen Gittern und Aktivmassen 226
 - 12.7 Herstellungsverfahren und weitere Komponenten zur Herstellung von Zellen oder Blöcken 226
 - 12.7.1 Herstellung von Stromkollektoren und Elektroden (Platten) 226
 - 12.7.2 Separator 227
 - 12.7.3 Herstellung von Plattensätzen 228
 - 12.7.4 Batteriegehäuse und Deckel 229
 - 12.7.5 Zellverbinder 230
 - 12.8 Strominhomogenität 230
 - 12.9 Säureschichtung 232

- 12.10 Auslegung und konstruktive Unterschiede bei verschiedenen Anwendungen 235
 - 12.10.1 Auslegung von Zellen 235
 - 12.10.2 Starterbatterien 236
 - 12.10.3 Traktionsbatterien für Flurförderzeuge und Semitraktionsbatterien 237
 - 12.10.4 Batterien für stationäre bzw. ortsfeste Anlagen 238
 - 12.10.5 Eigenschaften 239
 - 12.10.6 Entladeverhalten und Kapazität 239
 - 12.10.7 Überwachungsanforderungen beim Entladen 246
- 12.11 Leistungsabgabe und Innenwiderstand 246
- 12.12 Laden und Ladekennlinien 248
 - 12.12.1 Grundlegendes zum Laden von Blei-Säure-Batterien 248
 - 12.12.2 IU-Ladekennlinie 249
 - 12.12.3 IUoU-Ladekennlinie 251
 - 12.12.4 Weitere Ladekennlinien 252
 - 12.12.5 Bewertung der Ladekennlinien 255
 - 12.12.6 Vollladekriterien 257
- 12.13 Alterungseffekte 258
 - 12.13.1 Übersicht zu Alterungseffekten 258
 - 12.13.2 Verminderung der Oberfläche der aktiven Massen 260
 - 12.13.3 Sulfatierung 260
 - 12.13.4 Premature capacity loss (PLC) 261
 - 12.13.5 Abschlammen der Aktivmasse 261
 - 12.13.6 Korrosion des Separators 262
 - 12.13.7 Austrocknen des Elektrolyts (verschlossene Batterien) 262
 - 12.13.8 Dendritenbildung 263
 - 12.13.9 Sauerstoffverzehr und Entstehung von Unterdruck in verschlossenen Batterien 263
- 12.14 Korrosion des positiven Gitters, positiven Kopfbleis, negativer Pole und Interzellverbinder 263
 - 12.14.1 Korrosion des positiven Gitters 263
 - 12.14.2 Auswirkungen der Gitterkorrosion 265
 - 12.14.3 Korrosion der positiven Pole und Polbrücken (Kopfblei) 267
 - 12.14.4 Korrosion der negativen Gitter, Pole und Polbrücken 269
 - 12.14.5 Explosionsrisiko 270
- 12.15 Korrosion der Interzellverbinder 270
- 12.16 Betriebsstrategien und konstruktive Auswirkungen für Blei-Säure-Batterien 272
- 12.17 Zustandsbestimmung 274
 - 12.17.1 Ladezustand 274
 - 12.17.2 Kapazität bzw. State of Health 276
- 12.18 Sicherheit 277
 - 12.18.1 Explosionsrisiko durch Knallgas 277
 - 12.18.2 Wässrige Schwefelsäure 278
 - 12.18.3 Umgang mit Blei 279

XVI | *Inhaltsverzeichnis*

- 12.19 Batterieprobleme 279
 - Literatur 280
 - Aufgaben 283

- 13 Lithium-Ionen-Batterien 287**
 - 13.1 Einführung und wirtschaftliche Bedeutung 288
 - 13.2 Elektrochemie 288
 - 13.2.1 Grundprinzip 288
 - 13.2.2 Übersicht über aktive Komponenten 290
 - 13.2.3 Übersicht über die wichtigsten Reaktionen an der positiven und negativen Elektrode 291
 - 13.2.4 Nebenreaktionen 293
 - 13.2.5 Überlade- und Überentladereaktionen 294
 - 13.3 Aktivmaterialien 294
 - 13.3.1 Kathodenmaterialien 294
 - 13.3.2 Anodenmaterialien 297
 - 13.3.3 Ionenleitfähigkeit der Aktivmassen 301
 - 13.4 Elektrolyt 301
 - 13.4.1 Grundsätzliches 301
 - 13.4.2 Organische Lösungsmittel 302
 - 13.4.3 Weitere Bestandteile 303
 - 13.5 Solid-electrolyte interface (SEI) und die Bedeutung für die Lithium-Ionen-Batterie 305
 - 13.6 Stromkollektoren 307
 - 13.7 Produktion von Elektroden 308
 - 13.8 Separatoren 309
 - 13.9 Sicherheitsmaßnahmen 310
 - 13.10 Bauformen von Lithium-Ionen-Batterien 312
 - 13.10.1 Aufbau von Zellen 312
 - 13.10.2 Aufbau von Modulen und Batterien 315
 - 13.11 Auslegung und konstruktive Unterschiede bei verschiedenen Anwendungen 316
 - 13.11.1 Auslegung von Zellen 316
 - 13.11.2 Elektrotraktionsbatterien 318
 - 13.11.3 Starterbatterien 318
 - 13.11.4 Batterien für stationäre bzw. ortsfeste Anlagen 319
 - 13.11.5 Consumer-Batterien 320
 - 13.12 Eigenschaften 321
 - 13.12.1 Entladeverhalten und Kapazität 321
 - 13.12.2 Kapazitätsangabe und Kapazitätsmessung 322
 - 13.12.3 Überwachungsanforderungen 322
 - 13.13 Innenwiderstandsmessung 323
 - 13.14 Laden und Ladekennlinien 323
 - 13.14.1 Ladekennlinien 323
 - 13.14.2 Vollladung 324

- 13.14.3 Festkörperdiffusion beim Entladen und Laden 324
- 13.14.4 Laden bei tiefen Temperaturen 325
- 13.14.5 Schnellladen 325
- 13.15 Alterungseffekte 325
 - 13.15.1 Alterungseffekte allgemein 325
 - 13.15.2 Alterung der Kathode 326
 - 13.15.3 Alterung der Anode 327
 - 13.15.4 Alterung im Elektrolyt 330
 - 13.15.5 Korrosion des Separators 331
 - 13.15.6 Sonstige Alterungseffekte 331
- 13.16 Einfluss kalendarischer und zyklischer Alterung und Modellierung 331
 - 13.16.1 Alterung und die Notwendigkeit ihrer Modellierung 331
 - 13.16.2 Modellierung und Simulation von Alterung 332
 - 13.16.3 Quantitative Modellansätze zur Beschreibung von Alterung 335
- 13.17 Batteriemanagementsysteme und Batteriebetriebsstrategien 336
 - 13.17.1 Generelles 336
 - 13.17.2 Technische Realisierungen von Batteriemanagementsystemen für Lithium-Ionen-Batterien 337
 - 13.17.3 Balancing 339
 - 13.17.4 Datenanalyse und Fehlererkennung 340
 - 13.17.5 Integration von Kühlung und Heizung 341
- 13.18 Zustands- und Parameterbestimmung 341
 - 13.18.1 Ladezustand 341
 - 13.18.2 Kapazität, Innenwiderstand bzw. State of Health 342
- 13.19 Sicherheit 343
 - 13.19.1 Allgemeine Sicherheitsaspekte 343
 - 13.19.2 Missbrauchstests 344
- 13.20 State of Safety 346
 - 13.20.1 Generelle Situation 346
 - 13.20.2 Gefährdungs- und Sicherheitsstufen 346
 - 13.20.3 Sicherheitsgrenzen 348
 - 13.20.4 Definitionsversuche 349
- 13.21 Interne Kurzschlüsse 350
- 13.22 Thermal Runaway und thermische Propagation 351
 - 13.22.1 Problematik und Feldsituation 351
 - 13.22.2 Thermal runaway 353
 - 13.22.3 Thermische Propagation 357
- 13.23 Sicherheitsengineering 361
- 13.24 Batterieprobleme 362
 - Literatur 365
 - Aufgaben 367
- 14 Andere Batterietechnologien 369**
 - 14.1 Alkalische Nickel-Batterien 370
 - 14.1.1 Generelles 370

XVIII | *Inhaltsverzeichnis*

- 14.1.2 Physikalisch-chemische Grundlagen 370
- 14.1.3 Zellaufbau 372
- 14.1.4 Batterieeigenschaften 374
- 14.1.5 Alterungsverhalten 374
- 14.1.6 Sicherheitsaspekte 376
- 14.1.7 Optimaler Betrieb 377
- 14.1.8 Ausblick 377
- 14.2 Zink-Luft-Batterien 378
- 14.2.1 Generelles 378
- 14.2.2 Physikalisch-chemische Grundlagen 378
- 14.2.3 Zellaufbau 379
- 14.2.4 Eigenschaften 379
- 14.2.5 Alterungsverhalten 379
- 14.2.6 Optimaler Betrieb 380
- 14.2.7 Sicherheitseigenschaften 380
- 14.2.8 Ausblick 380
- 14.3 Redox-Flow-Batterien 380
- 14.3.1 Generelles und physikalisch-chemische Grundlagen 380
- 14.3.2 Ausblick 381
- 14.4 Hochtemperaturbatterien 382
- 14.4.1 Generelles 382
- 14.4.2 Physikalisch-chemische Grundlagen 382
- 14.4.3 Zellaufbau 383
- 14.4.4 Eigenschaften 383
- 14.4.5 Alterungserscheinungen 383
- 14.4.6 Sicherheitseigenschaften 383
- 14.4.7 Optimaler Betrieb 383
- 14.4.8 Ausblick 384
- 14.5 Lithium-Feststoffelektrolyt-Batterien 384
- 14.5.1 Generelles 384
- 14.5.2 Physikalisch-chemische Grundlagen 385
- 14.5.3 Ausblick 385
- 14.6 Lithium-Schwefel-Batterien 386
- 14.6.1 Generelles 386
- 14.6.2 Physikalisch-chemische Grundlagen 387
- 14.6.3 Ausblick 387
- 14.7 Lithium-Luft-Batterien 388
- 14.7.1 Generelles 388
- 14.7.2 Physikalisch-chemische Grundlagen 389
- 14.7.3 Aktueller Stand 389
- 14.8 Natrium-Luft-Batterien 390
- 14.8.1 Generelles 390
- 14.8.2 Physikalisch-chemische Grundlagen 390
- 14.8.3 Ausblick 390
- 14.9 Ultrakondensatoren und Hybridbatterien 390
- 14.9.1 Generelles 390

14.9.2	Physikalisch-chemische Grundlagen	391
14.9.3	Hybride Batteriekonzepte	392
	Literatur	392
	Aufgaben	393
15	Übersicht über Anwendungen	395
15.1	Allgemeine Bemerkungen	396
15.2	Leistungsverlauf	397
15.2.1	Gleichzeitige Verbindung von Batterien mit Ladegerät und Lasten	397
15.2.2	Zeitlich getrennte Verbindung von Batterien mit Ladegerät und Last	400
15.3	Ladezustand und Restkapazität	400
15.4	Wirkungsgrad	400
15.4.1	Wirkungsgrad bei zyklischer Belastung	401
15.4.2	Stand-by-Verluste	402
15.4.3	Relevanz des Wirkungsgrades der Batterie	402
15.5	Sicherheit und umweltverträglicher Umgang mit Batterien	403
15.6	Unterteilung in Anwendungsbereiche	403
15.6.1	Starterbatterien für Fahrzeuge (starting, lighting, ignition, SLI)	404
15.6.2	Batterien für die Elektromobilität	404
15.6.3	Batterien für Flurförderzeuge für den innerbetrieblichen Transport	404
15.6.4	Stationäre Anwendungen	405
15.6.5	Batterien für portable Geräte (Werkzeuge, Kommunikationsendgeräte etc.)	405
	Literatur	405
	Aufgaben	406
16	Starterbatterien für Fahrzeuge (starting, lighting, ignition, SLI)	407
16.1	Begriffsbestimmung	407
16.2	Anforderungen an die Batterie	408
16.3	Wahl der Batterietechnologie	412
16.4	Auslegung und Betrieb	414
16.5	Überwachung der Batterie	416
16.6	Sonstiges	417
	Literatur	417
	Aufgaben	417
17	Batterien für die Elektromobilität	419
17.1	Begriffsbestimmung	419
17.2	Anforderungen an die Batterie	421
17.3	Wahl der Batterietechnologie	424
17.4	Aufbau des Batteriesystems	425
17.5	Auslegung und Betrieb	426
17.6	Überwachung der Batterie	430
17.7	Sonstiges	431
	Literatur	432
	Aufgaben	433

XX | *Inhaltsverzeichnis*

- 18 Traktionsbatterien für den innerbetrieblichen Transport 435**
 - 18.1 Flurförderzeuge für den innerbetrieblichen Transport 435
 - 18.1.1 Anforderungen 436
 - 18.1.2 Wahl der Batterietechnologie 436
 - 18.1.3 Betrieb 438
 - 18.1.4 Überwachung von Batterien 444
 - 18.2 Kleintraktionsbatterien 444
 - 18.2.1 Anforderungen 445
 - 18.2.2 Wahl der Batterietechnologie 445
 - 18.2.3 Betrieb 445
 - Literatur 445

- 19 Stationäre Anwendungen von Batterien 447**
 - 19.1 Bereitschaftsparallelbetrieb für Netzersatz- und USV-Anlagen 448
 - 19.1.1 Begriffsklärung 448
 - 19.1.2 Anforderungen 450
 - 19.1.3 Wahl der Batterietechnologie 451
 - 19.1.4 Auslegung 452
 - 19.1.5 Betrieb 453
 - 19.1.6 Überwachung der Batterie 454
 - 19.1.7 Sonstige Informationen 460
 - 19.2 Dieselstart bei Netzersatzanlagen 460
 - 19.2.1 Anforderungen 461
 - 19.2.2 Wahl der Batterietechnologie 462
 - 19.2.3 Wartung und Fehlerdiagnose 463
 - 19.3 Batterien für den zeitlichen Ausgleich von Stromnachfrage und -angebot 463
 - 19.3.1 Anwendungsgruppen 463
 - 19.3.2 Anforderungen 465
 - 19.3.3 Wahl der Batterietechnologie 466
 - 19.3.4 Auslegung 467
 - 19.3.5 Betriebsstrategie 469
 - 19.3.6 Überwachung 470
 - 19.4 Batterien für die Stabilisierung des Energieversorgungssystems 470
 - 19.4.1 Beispiele für große Batteriespeicher auf der Welt und Bewertung 470
 - 19.4.2 Anforderungen 471
 - 19.4.3 Wahl der Batterietechnologie 472
 - 19.4.4 Sonstiges 472
 - Literatur 473
 - Aufgaben 473

- 20 Batterien für portable Anwendungen 477**
 - 20.1 Begriffsbestimmung 477
 - 20.2 Anforderungen an die Batterie 478
 - 20.3 Wahl der Batterietechnologie 479

20.4	Auslegung und Betrieb	480	
20.5	Überwachung der Batterien	481	
20.6	Sonstiges	481	
	Literatur	482	
	Aufgaben	482	
Anhang A Übersicht über Begriffe			483
Anhang B Sicherer und umweltverträglicher Umgang mit Batterien			495
B.1	Generelles	495	
B.2	Elektrische Sicherheit	496	
B.3	Brandschutz	499	
B.4	Explosionsschutz	500	
B.4.1	Explosionsschutz bei Blei-Säure-Batterien	501	
B.4.2	Explosionsschutz bei Lithium-Ionen-Batterien	504	
B.5	Bauliche Maßnahmen und Transport	504	
B.6	Umweltbelastung und Entsorgung	505	
	Literatur	505	
Anhang C Normenübersicht			507
Anhang D Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)			513
D.1	Begriffsübersicht	513	
D.2	Ergebnisdarstellung	515	
D.3	Bestimmung von Zellparametern mittels Impedanzspektroskopie	516	
D.4	Qualität der Parameterbestimmung	522	
	Literatur	524	
Anhang E Säureschichtung			525
	Literatur	529	
Stichwortverzeichnis			531

