

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

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	Wärmequelllichte	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	Temperaturauswirkungen	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

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 <i>SoH</i> und <i>SoF</i>	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

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

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

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

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