

Andreas Jossen
Wolfgang Weydanz

Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen

2. überarbeitete Auflage

239 Abbildungen
42 Tabellen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.
2. Auflage - Göttingen: Cuvillier, 2019

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2019

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen

2. überarbeitete Auflage, Februar 2019

ISBN 978-3-7369-9945-9

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung der Autoren ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem oder fotoelektrischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie, Scan) zu vervielfältigen.

Satz und Layout: Philipp Küchler und Christina Jossen

Umschlaggestaltung: Danil Nazarkin und Hanna Weydanz

Druck: Pachnicke Druck, Göttingen

Vorwort zur zweiten Auflage

Liebe Leserin, lieber Leser,

Sie halten die zweite, stark überarbeitete Auflage des „Batteriebuchs“ in der Hand. Danke, dass Sie so großes Interesse an unserem Wissen hatten und haben. Der Erfolg der ersten Auflage hat uns im Nachhinein zusätzlich bestärkt. Es gab und gibt einen deutlichen Bedarf an allgemein verständlichem Wissen zu elektrochemischen Speichern, deren Grundlagen und Anwendung. Das „Batteriebuch“ hat sich als leicht verständliches Nachschlagewerk, Vorlesungsbegleitung und Lektüre für Wissbegierige in deutscher Sprache sehr gut am Markt etabliert. Einige von Ihnen haben auch schon nachgefragt, wann denn die Neuauflage erscheinen werde. Danke für dieses Interesse und die damit verbundene Bestärkung unseres Konzepts.

In den vielen Jahren seit Erscheinen der ersten Auflage hat sich sehr viel getan im Bereich Batterien, speziell im noch jungen Bereich der Lithium-Ionen Batterien. Elektrochemische Energiespeicher sind - mehr als noch vor einer Dekade - aus unserem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Die Welt wird elektrisch und tragbar. In diesem Umfeld spielen elektrochemische Speicher eine zentrale Rolle.

Viele neue Marktsegmente wie große tragbare Elektrowerkzeuge und Gartengeräte, ein mittlerweile stark wachsender Markt im Bereich Elektrofahrzeuge, der boomende Markt der Elektrofahrräder, eine breite Elektrifizierung und Hybridisierung auch im Nutzfahrzeugbereich sowie der große Bereich der erneuerbaren Energien mit einem verbundenen Bedarf für „elektrische Speicher“ ändern unser tägliches Leben mehr und mehr. Für alle Bereiche sind Speicher eine Schlüsselkomponente.

Somit war es uns wichtig, die Informationen im Buch auf den neuesten Stand zu bringen. Gerade im Teil der Lithium-Ionen Zellen, deren

Systemtechnik sowie im Bereich der Messmethoden, beim Recycling und den Vorschriften gibt es viele neue Entwicklungen. Diese Kapitel liegen in komplett neuer, beziehungsweise in stark überarbeiteter Form vor. In den anderen Kapiteln haben wir alle Informationen auf den neuesten Stand gebracht. Allein im Kapitel 8 – Auslegung und Design von Batteriepacks – haben wir wenig geändert. Hier sind die Grundlagen beschrieben.

Besonderer Dank gilt allen Beteiligten, die uns tatkräftig unterstützt haben. Neben Philipp Küchler, der das Layout und den Satz gestaltet hat, sind das Danil Nazarkin, der das Umschlagbild erstellt und Jonas Westhoff der das Korrektorat übernommen hat.

Unser Dank gilt auch all denjenigen, die uns Grafiken und Bilder zur Verfügung gestellt haben. Ebenso danken wir Frank Gruendel, der uns zahlreiche Hinweise und Verbesserungsvorschläge zur ersten Auflage gemacht hat.

Wir wünschen Ihnen viele neue Einsichten und gute Erbauung beim Lesen oder Nachschlagen.

Andreas Jossen *Wolfgang Weydanz*
Fürstenfeldbruck Buckenhof

Februar 2019

Vorwort zur ersten Auflage

Die Idee zu diesem Buch entstand durch zahlreiche Seminare und Schulungen, die wir im Laufe der letzten Jahre - auch gemeinsam - gehalten haben. Die Fragen und Diskussionen mit Teilnehmern haben uns dazu animiert und ganz wesentlich den Inhalt dieses Buchs mit geprägt. Speziell anwendungsrelevante Themen wie Alterung, Ladetechnik und der optimale Einsatz von Batterien sind immer wieder ausgiebig diskutiert worden, so dass Sie für jedes in diesem Buch vorgestellte Batteriesystem behandelt werden. Wir haben hierbei versucht, das Verhalten einer Batterie durch die zugrundeliegenden physikalischen und chemischen Vorgänge zu erklären. Diese Brücke zwischen Theorie und Praxis zu schlagen war nicht immer einfach. Der mehr praxisorientierte Leser mag uns die Theorie an der ein oder anderen Stelle verzeihen oder sie geflissentlich überblättern.

Akkumulatoren und Batterien spielen im Zeitalter moderner Telekommunikations- und Informationstechniken eine immer größere Rolle. Die Entwicklung neuer Produkte ist oft stark mit der Verfügbarkeit von Hochenergie- oder Hochleistungsakkumulatoren korreliert. Viele Produkte, wie Mobiltelefone und Hybridfahrzeuge, wären ohne die modernen Lithium-Ionen und Nickelmetallhydrid Akkumulatoren nicht denkbar.

Auch wenn die Bleibatterie schon vor über 100 Jahren erfunden wurde, nur eine geringe Energiedichte besitzt und eigentlich kein modernes Batteriesystem ist, haben wir sie in diesem Buch ebenfalls beschrieben. Das lässt sich mit der großen Bedeutung dieses Systems rechtfertigen. Etwa die Hälfte des weltweit erwirtschafteten Umsatzes mit Akkumulatoren erfolgt immer noch mit Bleibatterien.

Beide Autoren arbeiten seit vielen Jahren im Bereich der Batterieentwicklung und -anwendung und haben sich mit den unterschiedlich-

ten Speichersystemen und deren Anwendung auseinandergesetzt. Neben der Entwicklung von Materialien für Lithium-Ionen Batterien haben wir uns mit dem Bau von Zellen, der Entwicklung von Managementsystemen für Batterien, der Auslegung und dem Test von Batterien auseinandergesetzt.

Die Erstellung dieses Buchs hat alle Beteiligten deutlich mehr in Anspruch genommen, als wir uns das zu Beginn vorgestellt haben. Besonderer Dank gilt Philipp Kückler, der in zahlreichen Nachtschichten das Layout erstellt, geändert und immer wieder verbessert hat. Mit großem Verständnis haben auch unseren Familien die Erstellung dieses Buchs unterstützt.

Ihnen hätte die meiste Zeit gehört...

Andreas Jossen Wolfgang Weydanz

Leipheim München

Dezember 2005

Inhalt

1	Grundlagen.....	1		
1.1	Einführung	1	1.7.4.1	Abhängigkeit der tatsächlichen Kapazität vom Entladestrom
1.1.1	Die Geschichte des Akkumulators.....	1	1.7.4.2	Abhängigkeit der tatsächlichen Kapazität von der Temperatur.....
1.1.2	Märkte und Anwendungen	3	1.7.5	Ladefaktor und Wirkungsgrade
1.1.3	Generelle Trends aus Sicht der Anwendungen	5	1.8	Optimierung von Batterien
1.2	Prinzipieller Aufbau einer elektrochemischen Zelle	5	2	Bleibatterien.....
1.2.1	Speicher und Wandler	5	2.1	Geschichte der Bleibatterie
1.2.2	Zelle, Batterie und Akkumulator	7	2.2	Anwendungen
1.2.3	Aufbau einer Zelle	7	2.3	Aufbau und verwendete Materialien ..
1.3	Funktionsweise.....	10	2.3.1	Aktivmaterialien.....
1.3.1	Die elektrische Ladung.....	10	2.3.2	Stromableiter/Gitter.....
1.3.2	Chemische Massen	10	2.3.2.1	Konstruktionsprinzipien
1.3.3	Äquivalenz zwischen elektrischer Ladung und chemischer Masse.....	11	2.3.2.2	Weitere Konstruktionsprinzipien.....
1.3.4	Thermodynamik für Batterien	12	2.3.2.3	Gitterlegierungen.....
1.3.5	Halbzellenpotentiale und Spannungsreihe	16	2.3.3	Elektrolyt
1.3.6	Nebenreaktionen.....	17	2.3.4	Separator
1.4	Verhalten im Ruhezustand und unter Belastung.....	18	2.3.5	Gehäuse
1.4.1	Ruhepotential	19	2.4	Reaktionsgleichungen
1.4.2	Überspannungen	19	2.4.1	Hauptreaktionen
1.4.2.1	Ohmsche Überspannung.....	19	2.4.2	Nebenreaktionen.....
1.4.2.2	Durchtrittsüberspannung	20	2.5	Der verschlossene Bleiakкумулятор (VRLA)
1.4.2.3	Doppelschichtkapazität	22	2.6	Eigenschaften von Bleibatterien
1.4.2.4	Diffusionsüberspannung.....	24	2.6.1	Energie- und Leistungswerte
1.5	Thermisches Verhalten von Batterien..	25	2.6.2	Ruhepotential
1.5.1	Strom-/Spannungscharakteristik und Alterung	25	2.6.3	Entladeeigenschaften
1.5.2	Wärmehaushalt	26	2.6.3.1	Abhängigkeit vom Entladestrom
1.5.2.1	Interne Wärmequellen und -senken...	27	2.6.3.2	Abhängigkeit von der Temperatur.....
1.5.2.2	Wärmeabgabe durch Strahlung	27	2.6.4	Ladecharakteristik.....
1.5.2.3	Wärmeabgabe durch Konvektion	28	2.6.5	Selbstentladung und Lagerung.....
1.5.2.4	Wärmeabgabe durch Wärmeleitung...	28	2.7	Alterungsmechanismen.....
1.6	Primärzellen und wiederaufladbare Zellen	29	2.7.1	Sulfatierung.....
1.7	Wichtige Definitionen.....	29	2.7.2	Gitterkorrosion.....
1.7.1	Stromstärke und deren Normierung...	29	2.7.3	Säureschichtung.....
1.7.2	Energie- und Leistungsdaten.....	30	2.8	Sicherheit von Bleibatterien
1.7.3	Nennspannung.....	30	2.8.1	Belüftung von Bleibatterien.....
1.7.4	Nennkapazität und tatsächliche Kapazität	31	2.8.2	Sicherheitsmaßnahmen im Nahbereich der Batterien.....
			2.8.3	Weitere Vorschriften zur Sicherheit... ..
			2.9	Optimaler Betrieb von Bleibatterien... ..

3	Alkalische Batterien (NiCd, NiMH)	4	Lithiumbatterien.....	111
			
3.1	Einführung	4.1	Einleitung	111
3.2	Anwendungen	4.2	Anwendungen und Markt	113
3.3	Aufbau und verwendete Materialien ..	4.3	Funktionsprinzip und Materialien für Lithium-Ionen Zellen	115
3.3.1	Aktivmaterial der positiven Elektrode ..	4.3.1	Funktionsprinzip einer Lithium-Ionen Zelle	115
3.3.2	Aktivmaterial der negativen Elektrode ..	4.3.2	Materialien für Lithium-Ionen Zellen ..	119
3.3.2.1	NiCd Batterie.....	4.3.3	Materialien der negativen Elektrode ...	121
3.3.2.2	Metallhydrid der NiMH Batterie	4.3.3.1	Lithium-Metall	121
3.3.3	Stromableiter	4.3.3.2	Amorpher Kohlenstoff	122
3.3.3.1	Gesinterte Elektroden	4.3.3.3	Graphit	122
3.3.3.2	Geschäumte Elektroden.....	4.3.3.4	Hard Carbons	124
3.3.3.3	Weitere Konstruktionsprinzipien.....	4.3.3.5	Lithiumlegierungen	125
3.3.4	Elektrolyt	4.3.3.6	Legierungs-Kohlenstoff-Komposite ...	128
3.3.5	Separator	4.3.3.7	Lithium-Titanat, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	129
3.3.6	Gehäuse	4.3.3.8	Zusammenfassung der Materialien der negativen Elektrode	131
3.4	Reaktionsgleichungen	4.3.4	Materialien der positiven Elektrode ...	131
3.4.1	Hauptreaktionen der NiCd Batterie ...	4.3.4.1	LiCoO_2	131
3.4.2	Hauptreaktionen der NiMH Batterie ..	4.3.4.2	LiNiO_2	132
3.4.3	Nebenreaktionen	4.3.4.3	$\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$	133
3.5	Gasdichte NiCd und NiMH Akkumulatoren	4.3.4.4	LiMn_2O_4	134
	4.3.4.5	Mischungen von Kathodenmaterialien	134
3.6	Die wichtigsten Eigenschaften	4.3.4.6	$\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$	135
3.6.1	Energie- und Leistungswerte	4.3.4.7	LiFePO_4	136
3.6.2	Ruhepotential	4.3.4.8	Zusammenfassung der Materialien der positiven Elektrode	137
3.6.3	Entladeeigenschaften	4.3.5	Weitere Entwicklungstrends	137
3.6.3.1	Abhängigkeit vom Entladestrom	4.3.6	Nano-Materialien für Lithium-Ionen Systeme	139
3.6.3.2	Abhängigkeit von der Temperatur.....	4.3.7	Stromableiter, Elektrodenaufbau und Separatoren	140
3.6.4	Ladecharakteristik	4.3.7.1	Stromableiter	140
3.6.5	Selbstentladung und Lagerung	4.3.7.2	Elektrodenaufbau	141
3.7	Alterungsmechanismen.....	4.3.7.3	Separatoren	141
3.7.1	Reversible Effekte	4.3.8	Elektrolyte und Grenzflächen	144
3.7.1.1	Der klassische Memory-Effekt	4.3.8.1	Elektrolyte	144
3.7.1.2	Der Memory-Effekt	4.3.8.2	Grenzflächen und SEI-Film	148
3.7.2	Alterung der Ni-Elektrode (NiCd und NiMH)	4.3.8.3	Lithium-Ionen versus Lithium-Polymer Zellen.....	150
	4.3.9	Andere Lithium-Systeme	151
3.7.3	Alterung der Metallhydelektrode ...	4.3.10	Nächste Generation von Lithiumzellen	152
3.7.4	Wasserverlust	4.4	Lithiumzellen für Hochstromanwendungen	154
3.7.5	Bildung von Kurzschlüssen (NiCd) ...	4.5	Eigenschaften von Lithium-Ionen Zellen	157
3.8	Sicherheit von NiCd und NiMH Batterien			
			
3.9	Optimaler Betrieb von NiMH und NiCd Batterien			
			

4.5.1 Spannungsverlauf im Ruhezustand. 157

4.5.2 Entladeverhalten 159

4.5.3 Einfluss der Temperatur beim Entladen 162

4.5.4 Betriebsströme und Spannungsgrenzen 164

4.5.5 Ladeverfahren. 165

4.5.6 Anwendungsbereich und Lagerung . . . 166

4.6 Alterung von Lithium-Ionen Zellen . . . 168

4.6.1 Kapazitätsverlust, Innenwiderstandsanstieg
und Alterung beim Gebrauch 173

4.6.1.1 Generelle Überlegungen zur Alterung . 173

4.6.1.2 Alterung und Abhängigkeit von der
Temperatur 176

4.6.1.3 Alterung und Abhängigkeit von der
Spannung 176

4.6.1.4 Alterung und Abhängigkeit vom
Ladezustand 177

4.6.1.5 Alterung und Abhängigkeit vom Strom 179

4.6.1.6 Alterung und Abhängigkeit von der
Zykltiefe 179

4.6.2 Nachbemerkung 180

4.7 Sicherheit von Lithium-Ionen Zellen . . 181

4.7.1 Generelles zur Sicherheit von Lithium-Ionen
Zellen 181

4.7.2 Sicherheitsvorkehrungen in den
Zellmaterialien 183

4.7.2.1 Sicherheit von Kathodenmaterialien . . 183

4.7.2.2 Balancierung der Elektroden 183

4.7.2.3 Keramische Beschichtungen auf den
Elektroden 184

4.7.2.4 Shut-Down-Separator 185

4.7.2.5 Kupfer-Dendriten-Thematik 185

4.7.2.6 Flammschutz-Additive zum
Elektrolyten 186

4.7.2.7 Überlade-Shuttle in der Zelle 187

4.7.3 Sicherheitsvorkehrungen im mechanischen
Zellaufbau oder außerhalb der Zelle . . 187

4.7.3.1 Current Interrupt Device (CID) und
Sicherheitsventil 188

4.7.3.2 PTC-Element 189

4.7.3.3 Sicherheitselektronik 190

4.7.4 Ebenen der Sicherheit im System 190

4.7.5 Potentielle Gefahren und Schäden . . . 190

4.8 Empfehlungen für den optimalen Betrieb
von Lithium-Ionen Zellen 192

4.9 Zusammenfassung 193

5

**Reserven an Batteriematerialien,
Sicherheit, Transport sowie
Recycling von Batterien. 195**

5.1 Reserven an Batteriematerialien 195

5.1.1 Blei 195

5.1.2 Nickel 196

5.1.3 Lithium 196

5.1.4 Kobalt 198

5.1.5 Graphit 198

5.1.6 Mangan und Eisen 199

5.1.7 Kupfer und Aluminium 199

5.1.8 Zusammenfassung Reserven 200

5.2 Sicherheitstests 200

5.2.1 Sicherheitstests an Zellen und Systemen
. 201

5.2.2 Sicherheitstests gemäß der
Gefahrgutvorschriften für Zellen bzw.
Batterien 202

5.2.3 Testkriterien und Hazard Levels 203

5.2.4 Anwendungsspezifische Standards . . . 203

5.3 Vorschriften für die Beförderung
(Verpackung und Durchführung des
Transports) 204

5.3.1 Verpackung 204

5.3.2 Durchführung des Transports 206

5.3.3 Besondere Transportzulassung 206

5.4 Recycling von Batterien 207

5.4.1 Vorschriften und Kennzeichnungspflicht
. 207

5.4.2 Rücklauf und Rücknahme von Batterien
. 208

5.4.3 Organisationen des Recyclings von Batterien
. 210

5.4.4 Verfahren des Recyclings 211

5.4.4.1 Trennen der Batteriearten 211

5.4.4.2 Recycling von Bleibatterien 211

5.4.4.3 Recycling von NiCd Batterien 212

5.4.4.4 Recycling von NiMH Batterien 213

5.4.4.5 Recycling von Lithium-Ionen Batterien 213

5.4.5 Vermeidung von Umweltbelastungen durch
Batterien 213

6

Batteriesystemtechnik. 215

6.1 Batteriemangement 215

6.1.1	Sicherheitsmanagement	216			
6.1.2	Überwachung	217	7	Batterieprüftechnik	269
6.1.3	Aktives Management	219			
6.1.4	Thermisches Management	219	7.1	Einführung	269
6.1.5	Batteriemanagement-Architekturen	222	7.2	Normen und Richtlinien	270
6.1.6	Das Smart-Battery-System	223	7.2.1	Normen zu Baugrößen und zur Benennung	271
6.2	Ladeverfahren	224	7.2.2	Normen für die Prüfung von Batterien	274
6.2.1	Einführung	224	7.2.3	Normen zur Sicherheit	275
6.2.2	Die Nomenklatur klassischer Ladeverfahren	226	7.3	Prüfmethoden	275
6.2.3	Ladephasen	226	7.3.1	Messung der Entladeeigenschaften	276
6.2.4	Puls-ladeverfahren (Prinzip)	228	7.3.2	Lagerungstest und Messung der Selbstentladung	278
6.2.5	Ladeverfahren für NiCd und NiMH Batterien	229	7.3.3	Test der Wiederaufladbarkeit	280
6.2.5.1	I- und Ia-Ladung	230	7.3.4	Wirkungsgradmessungen	280
6.2.5.1.1	Abschaltkriterien für die Ia-Ladung	230	7.3.5	Messung von Energie- und Leistungsdaten	281
6.2.5.2	Erhaltungsladung von NiMH und NiCd Batterien	235	7.3.6	Widerstands- und Impedanzmessungen	282
6.2.5.3	Weiterentwickelte Ladeverfahren	236	7.3.6.1	Gleichstromwiderstand	283
6.2.5.3.1	Laden mit PWM-Strom	236	7.3.6.2	Wechselstromwiderstand	284
6.2.5.3.2	Weitere Ladeverfahren	238	7.3.6.3	Impedanzmessungen	284
6.2.5.4	Probleme beim Laden von NiMH und NiCd Batterien	240	7.3.7	Lebensdauer-tests	291
6.2.6	Ladeverfahren für Lithium-Ionen Batterien	244	7.4	Prüfgeräte	292
6.2.6.1	Vorladephase bei Lithium-Ionen Batterien	244	7.4.1	Geräte für die Schnellprüfung (Servicegeräte)	292
6.2.6.2	IUA-Ladung	246	7.4.1.1	Geräte zur Messung der Säuredichte in Bleibatterien	292
6.2.6.3	Puls-ladeverfahren	249	7.4.1.2	Spannungsmessgeräte	293
6.2.6.4	Weitere Ladeverfahren für Lithium-Ionen Batterien	251	7.4.1.3	Hochstromtestgeräte	294
6.2.6.5	Erhaltungsladung	252	7.4.1.4	Entladegeräte	295
6.2.7	Ladeverfahren für Bleibatterien	253	7.4.1.5	Geräte zur Messung des Innenwiderstands	295
6.2.7.1	Die IU- und IUA-Ladung	253	7.4.2	Ladegeräte mit Zusatzfunktionen (Hobbyanwendungen)	295
6.2.7.2	Die IU0U-Ladung	254	7.4.3	Testgeräte für Industrieanwendungen	296
6.2.7.3	Die IUJa-Ladung	255	7.4.4	Batterieprüflabore	296
6.2.7.4	Wa- und W0Wa-Ladung	256			
6.2.7.5	Weiterentwickelte Ladeverfahren	257			
6.3	Batteriezustandsbestimmung	257	8	Auslegung und Design von Batteriepacks	299
6.3.1	Definitionen	259	8.1	Anwendungen und deren Anforderungen	299
6.3.2	Methoden zur Bestimmung des Lade- und Alterungszustands	262	8.1.1	Generelles zur Wahl des Zelltyps	299
6.3.2.1	Messung der Ruhespannung	262	8.1.2	Richtige Auslegung von Batteriepacks	300
6.3.2.2	Bilanzierende Verfahren	263	8.1.3	Innenwiderstände von Batteriepacks	301
6.3.2.3	Modellbasierte Verfahren	265	8.2	Von der Einzelzelle zum Batteriepack	302
6.3.2.4	Impedanzmessungen	266			
6.3.2.5	Weitere Verfahren zur Bestimmung der Alterung	267			

8.2.1	Generelles zu Zellen in Batteriepacks . . .	302	9.5.1	Zellreaktion von Metall-Luft Zellen . . .	332
8.2.2	Verschaltung von Zellen zu Batteriepacks	302	9.5.2	Eigenschaften von Metall-Luft Zellen . .	334
8.2.2.1	Nickelbasierte Zellen im Pack	302	9.5.3	Stand der Entwicklung und Weiterentwicklung von Metall-Luft Zellen	335
8.2.2.2	Lithium-Ionen und Lithium-Polymer Zellen im Pack	305	9.6	Weitere Möglichkeiten der Energieversorgung	335
8.3	Dimensionierung von Batteriepacks . . .	307	9.7	Konkurrenz oder Kooperation: Hybridsysteme	337
8.4	Laden im Pack	308			
8.4.1	Ladetechnik für Packs mit Nickel-basierten Systemen	308	10	Literatur	339
8.4.2	Ladetechnik für Packs mit Lithium-Ionen Zellen	308			
8.5	Sicherheitstests und Transportvorschriften	313			
8.5.1	Sicherheitstests an Zellen	313			
8.5.3	Transportvorschriften	313			

9 Weitere Entwicklungen 315

9.1	Dünnschichtzellen	315
9.2	Brennstoffzellen	316
9.2.1	Elektrolyse und Brennstoffzelle	316
9.2.2	Arten von Brennstoffzellen	317
9.2.2.1	Festbrennstoffzellen (SOFC)	317
9.2.2.2	Polymermembranbrennstoffzellen (PEM)	319
9.2.2.3	Direktmethanolbrennstoffzellen (DMFC)	320
9.2.2.4	Weitere Brennstoffzellentypen	321
9.2.2.5	Mikrobrennstoffzellen	321
9.2.3	Vorteile und Nachteile der Brennstoffzelle	322
9.3	Kondensatoren	323
9.3.1	Dielektrische Kondensatoren	324
9.3.1.1	Aufbau von Kondensatoren und eingesetzte Materialien	325
9.3.1.2	Elektrolytkondensatoren	327
9.3.2	Doppelschichtkondensatoren	327
9.4	Lithium-Schwefel Zellen	330
9.4.1	Zellreaktion von Lithium-Schwefel Zellen	330
9.4.2	Eigenschaften von Lithium-Schwefel Zellen	331
9.4.3	Stand der Entwicklung und Weiterentwicklung von Lithium-Schwefel Zellen	332
9.5	Metall-Luft Zellen	332

Stichwortverzeichnis 345