

Inhalt

Vorwort	III	1.7	Wichtige Definitionen	24
		1.7.1	Stromstärke und deren Normierung.	24
		1.7.2	Energie- und Leistungsdaten. ...	25
		1.7.3	Nennspannung	26
		1.7.4	Nennkapazität und tatsächliche	
			Kapazität	26
		1.7.4.1	Abhängigkeit der tatsächlichen	
			Kapazität vom Entladestrom.	26
		1.7.4.2	Abhängigkeit der tatsächlichen	
			Kapazität von der Temperatur	27
		1.7.5	Ladefaktor und Wirkungsgrade	27
		1.8	Optimierung von Batterien	29
1 Grundlagen	1	2	Bleibatterien	33
1.1 Einführung	1	2.1	Geschichte der Bleibatterie	33
1.1.1 Die Geschichte des Akkumulators ...	1	2.2	Anwendungen	33
1.1.2 Märkte und Anwendungen	3	2.3	Aufbau und verwendete Materialien.	34
1.1.3 Generelle Trends aus Sicht der		2.3.1	Aktivmaterialien	35
Anwendungen	4	2.3.2	Stromableiter/Gitter	36
1.2 Prinzipieller Aufbau einer		2.3.2.1	Konstruktionsprinzipien	36
elektrochemischen Zelle	5	2.3.2.2	Weitere Konstruktionsprinzipien. ...	37
1.2.1 Speicher und Wandler.	5	2.3.2.3	Gitterlegierungen.	38
1.2.2 Zelle, Batterie und Akkumulator	6	2.3.3	Elektrolyt	39
1.2.3 Aufbau einer Zelle	6	2.3.4	Separator	41
1.3 Funktionsweise	9	2.3.5	Gehäuse	42
1.3.1 Die elektrische Ladung	9	2.4	Reaktionsgleichungen	42
1.3.2 Chemische Massen	9	2.4.1	Hauptreaktionen	42
1.3.3 Äquivalenz zwischen elektrischer		2.4.2	Nebenreaktionen.	44
Ladung und chemischer Masse	10	2.5	Der verschlossene Bleiakкумулятор .	45
1.3.4 Thermodynamik für Batterien	11	2.6	Eigenschaften von Bleibatterien	46
1.3.5 Halbzellenpotentiale und		2.6.1	Energie- und Leistungswerte	46
Spannungsreihe	14	2.6.2	Ruhepotential	47
1.3.6 Nebenreaktionen	15	2.6.3	Entladeeigenschaften	47
1.4 Verhalten im Ruhezustand		2.6.3.1	Abhängigkeit vom Entladestrom	49
und unter Belastung	16	2.6.3.2	Abhängigkeit von der Temperatur ...	51
1.4.1 Ruhespannung.	16	2.6.4	Ladecharakteristik	52
1.4.2 Überspannungen	17	2.6.5	Selbstentladung und Lagerung.	52
1.4.2.1 Ohmsche Überspannung.	17	2.7	Alterungsmechanismen	53
1.4.2.2 Durchtrittsüberspannung	17	2.7.1	Sulfatierung	54
1.4.2.3 Doppelschichtkapazität	18	2.7.2	Gitterkorrosion	55
1.4.2.4 Diffusionsüberspannung	20	2.7.3	Säureschichtung	56
1.5 Thermisches Verhalten				
von Batterien	21			
1.5.1 Strom-/Spannungscharakteristik				
und Alterung	21			
1.5.2 Wärmehaushalt	22			
1.5.2.1 Interne Wärmequellen und -senken .	22			
1.5.2.2 Wärmeabgabe durch Strahlung.	23			
1.5.2.3 Wärmeabgabe durch Konvektion ...	23			
1.5.2.4 Wärmeabgabe durch Wärmeleitung .	23			
1.6 Primärzellen und wiederaufladbare				
Zellen	24			

VI Inhalt

2.8	Sicherheit von Bleibatterien	58	3.7.4	Wasserverlust	95
2.8.1	Belüftung von Bleibatterien	59	3.7.5	Bildung von Kurzschlüssen (NiCd) ..	96
2.8.2	Sicherheitsmaßnahmen im Nahbereich der Batterien	60	3.8	Sicherheit von NiCd und NiMH Batterien	97
2.8.3	Weitere Vorschriften zur Sicherheit ..	60	3.9	Optimaler Betrieb von NiMH und NiCd Batterien	98
2.9	Optimaler Betrieb von Bleibatterien .	61			

3 Alkalische Batterien (NiCd, NiMH) 63

3.1	Einführung	63
3.2	Anwendungen	65
3.3	Aufbau und verwendete Materialien. .	66
3.3.1	Aktivmaterial der positiven Elektrode	67
3.3.2	Aktivmaterial der negativen Elektrode	68
3.3.2.1	NiCd Batterie	68
3.3.2.2	Metallhydrid der NiMH Batterie	69
3.3.3	Stromableiter	71
3.3.3.1	Gesinterte Elektroden	71
3.3.3.2	Geschäumte Elektroden	72
3.3.3.3	Weitere Konstruktionsprinzipien	73
3.3.4	Elektrolyt	74
3.3.5	Separator	75
3.3.6	Gehäuse	76
3.4	Reaktionsgleichungen	76
3.4.1	Hauptreaktionen der NiCd Batterie .	76
3.4.2	Hauptreaktionen der NiMH Batterie	77
3.4.3	Nebenreaktionen	79
3.5	Gasdichte NiCd und NiMH Akkumulatoren	79
3.6	Die wichtigsten Eigenschaften	81
3.6.1	Energie- und Leistungswerte	81
3.6.2	Ruhespannung	81
3.6.3	Entladeeigenschaften	82
3.6.3.1	Abhängigkeit vom Entladestrom	82
3.6.3.2	Abhängigkeit von der Temperatur ...	82
3.6.4	Ladecharakteristik	85
3.6.5	Selbstentladung und Lagerung	85
3.7	Alterungsmechanismen	87
3.7.1	Reversible Effekte	87
3.7.1.1	Der klassische Memory Effekt	89
3.7.1.2	Der Memory Effekt	89
3.7.2	Alterung der Ni-Elektrode (NiCd und NiMH)	91
3.7.3	Alterung der Metallhydridelektrode .	92

4 Lithiumbatterien 101

4.1	Einleitung	101
4.2	Markt und Anwendungen	103
4.3	Funktionsprinzip einer Lithium-Ionen Zelle	104
4.4	Materialien für Lithium-Ionen Zellen	107
4.4.1	Materialien der negativen Elektrode	108
4.4.1.1	Lithium-Metall	108
4.4.1.2	Amorpher Kohlenstoff	109
4.4.1.3	Graphit	110
4.4.1.4	Lithiumlegierungen	111
4.4.1.5	Metalloxide	112
4.4.1.6	Lithium-Titanat, $Li_4Ti_5O_{12}$	112
4.4.1.7	Zusammenfassung der Materialien der negativen Elektrode	114
4.4.2	Materialien der positiven Elektrode .	114
4.4.2.1	$LiCoO_2$	114
4.4.2.2	$LiNiO_2$	115
4.4.2.3	$LiMn_2O_4$	116
4.4.2.4	$Li(Ni_xCo_yMn_z)O_2$	117
4.4.2.5	$LiFePO_4$	117
4.4.2.6	Zusammenfassung der Materialien der positiven Elektrode	118
4.4.3	Weitere Entwicklungstrends	118
4.4.4	Nano-Materialien für Lithium-Ionen Systeme	119
4.4.5	Stromableiter, Elektrodenaufbau und Separator	121
4.4.5.1	Stromableiter	121
4.4.5.2	Elektrodenaufbau	121
4.4.5.3	Separatoren	121
4.4.6	Elektrolyte und Grenzflächen	123
4.4.6.1	Elektrolyt	123
4.4.6.2	Grenzflächen und SEI-Film	124
4.4.6.3	Lithium-Ionen versus Lithium-Polymer Zellen	126
4.5	Andere Lithium-Systeme	127

4.6	Nächste Generation von Lithiumzellen	129	6.1.1	Sicherheitsmanagement	164
4.7	Lithiumzellen für Hochstromanwendungen	130	6.1.2	Überwachung	165
4.8	Sicherheit von Lithium-Ionen Zellen	133	6.1.3	Aktives Management	166
4.9	Eigenschaften von Lithium-Ionen Zellen	135	6.1.4	Thermisches Management	167
4.9.1	Spannungsverlauf im Ruhezustand .	135	6.1.5	Das Smart Battery System	169
4.9.2	Entladeverhalten	136	6.1.6	Individuelle Batterie-managementsysteme	170
4.9.3	Einfluss der Temperatur beim Entladen	137	6.2	Ladeverfahren	171
4.9.4	Anwendungsbereich und Lagerung .	140	6.2.1	Einführung	171
4.9.5	Alterung von Lithiumzellen.....	141	6.2.2	Die Nomenklatur klassischer Ladeverfahren	172
4.9.6	Kapazitätsverlust beim Gebrauch ...	144	6.2.3	Ladephasen.....	173
4.9.7	Nachbemerkung	146	6.2.4	Puls-ladeverfahren (Prinzip).....	174
4.10	Schutzelektronik und Standardladeverfahren.....	146	6.2.5	Ladeverfahren für NiCd und NiMH Batterien	175
4.10.1	Maximale Ladespannung	146	6.2.5.1	I und Ia Ladung	176
4.10.2	Ladeverfahren	147	6.2.5.1.1	Abschaltkriterien für die Ia Ladung.....	177
4.11	Empfehlungen für den optimalen Betrieb von Lithium-Ionen Zellen ...	150	6.2.5.2	Erhaltungsladung von NiMH und NiCd Batterien	183
4.12	Zusammenfassung	151	6.2.5.3	Weiterentwickelte Ladeverfahren ...	183
5	Recycling von Batterien	153	6.2.5.3.1	Laden mit PWM Pulsmustern nach TEMIC	183
5.1	Vorschriften und Kennzeichnungspflicht	153	6.2.5.3.2	Das Reflex® Ladeverfahren	185
5.2	Rücklauf und Rücknahme von Batterien	154	6.2.5.3.3	Das ACT Ladeverfahren	186
5.3	Organisationen zum Batterierecycling	156	6.2.5.3.4	Das CCS Ladeverfahren	187
5.4	Recyclingverfahren	157	6.2.5.3.5	Das ECS Ladeverfahren	188
5.4.1	Trennung der Batteriearten.....	157	6.2.5.3.6	Das VDX Ladeverfahren	188
5.4.2	Recycling von Bleibatterien.....	158	6.2.5.3.7	Druckgesteuertes Laden I-C3	189
5.4.3	Recycling von NiCd Batterien	159	6.2.5.4	Probleme beim Laden von NiMH und NiCd Batterien	190
5.4.4	Recycling von NiMH Batterien	159	6.2.6	Ladeverfahren für Lithium-Ionen Batterien	193
5.4.5	Recycling von Lithium-Ionen Batterien	160	6.2.6.1	Vorladephase bei Lithium-Ionen Batterien	193
5.4.6	Recycling von quecksilberhaltigen Knopfzellen.....	160	6.2.6.2	IUA Ladung	194
5.5	Vermeidung von Umweltbelastungen durch Batterien	160	6.2.6.3	Puls-ladeverfahren	197
6	Batteriesystemtechnik	163	6.2.6.4	Weitere Ladeverfahren für Lithium-Ionen Batterien	198
6.1	Batteriemanagement	163	6.2.6.5	Erhaltungsladung	199
			6.2.7	Ladeverfahren für Bleibatterien	199
			6.2.7.1	Die IU und IUA Ladung	199
			6.2.7.2	Die IU0U Ladung	200
			6.2.7.3	Die IUIa Ladung	201
			6.2.7.4	Wa und W0Wa Ladung	202
			6.2.7.5	Weiterentwickelte Ladeverfahren ...	202
			6.3	Batteriezustandsbestimmung	204
			6.3.1	Definitionen	205

6.3.2	Methoden zur Bestimmung des Lade- und Alterungszustands	207		
6.3.2.1	Messung der Ruhespannung	208		
6.3.2.2	Bilanzierende Verfahren	209		
6.3.2.3	Modellbasierte Verfahren	211		
6.3.2.4	Impedanzmessungen	211		
6.3.2.5	Weitere Verfahren zur Bestimmung der Alterung	212		
7	Batterieprüftechnik	215	8	Auslegung und Design von Batteriepacks 237
7.1	Einführung	215	8.1	Anwendungen und deren Anforderungen 237
7.2	Normen und Richtlinien	215	8.1.1	Generelles zur Wahl des Zelltyps 237
7.2.1	Normen zu Baugrößen und zur Benennung	217	8.1.2	Richtige Auslegung von Batteriepacks 238
7.2.2	Normen für die Prüfung von Batterien	219	8.1.3	Innenwiderstände von Batteriepacks 239
7.2.3	Normen zur Sicherheit	219	8.2	Von der Einzelzelle zum Batteriepack 240
7.3	Prüfmethoden	220	8.2.1	Generelles zu Zellen in Batteriepacks 240
7.3.1	Messung der Entladeeigenschaften	221	8.2.2	Verschaltung von Zellen zu Batteriepacks 240
7.3.2	Lagerungstest und Messung der Selbstentladung	223	8.2.2.1	Nickelbasierte Zellen im Pack 240
7.3.3	Test der Wiederladbarkeit	223	8.2.2.2	Lithium-Ionen und Lithium-Polymer Zellen im Pack 243
7.3.4	Wirkungsgradmessungen	224	8.3	Dimensionierung von Batteriepacks . 245
7.3.5	Messung von Energie- und Leistungsdaten	224	8.4	Laden im Pack 246
7.3.6	Widerstands und Impedanzmessungen	225	8.4.1	Ladetechnik für Packs mit Nickel-basierten Systemen 246
7.3.6.1	Gleichstromwiderstand	225	8.4.2	Ladetechnik für Packs mit Lithium-Ionen Zellen 246
7.3.6.2	Wechselstromwiderstand	226	8.5	Sicherheitstests und Transportvorschriften 251
7.3.6.3	Impedanzmessungen	227	8.5.1	Sicherheitstests an Zellen 251
7.3.7	Lebensdauerests	229	8.5.2	Verpackungsvorschriften 251
7.4	Prüfgeräte	230	8.5.3	Transportvorschriften 252
7.4.1	Geräte für die Schnellprüfung (Servicegeräte)	230	9	Weitere Entwicklungen 255
7.4.1.1	Geräte zur Messung der Säuredichte in Bleibatterien	231	9.1	Dünnschichtzellen 255
7.4.1.2	Spannungsmessgeräte	232	9.2	Brennstoffzellen 256
7.4.1.3	Hochstromtestgeräte	232	9.2.1	Elektrolyse und Brennstoffzelle 256
7.4.1.4	Entladegeräte	233	9.2.2	Arten von Brennstoffzellen 257
7.4.1.5	Geräte zur Messung des Innenwiderstands	233	9.2.2.1	Festbrennstoffzellen (SOFC) 257
7.4.2	Ladegeräte mit Zusatzfunktionen (Hobbyanwendungen)	234	9.2.2.2	Polymermembranbrennstoffzellen (PEM) 259
7.4.3	Testgeräte für Industrieanwendungen	234	9.2.2.3	Direktmethanolbrennstoffzellen (DMFC) 260
7.4.4	Batterieprüflabore	235	9.2.2.4	Weitere Brennstoffzellentypen 261
			9.2.2.5	Mikrobrennstoffzellen 261
			9.2.3	Vorteile und Nachteile der Brennstoffzelle 262
			9.3	Kondensatoren 263

9.3.1	Dielektrische Kondensatoren	264
9.3.1.1	Aufbau von Kondensatoren und eingesetzte Materialien	265
9.3.1.2	Elektrolytkondensatoren	267
9.3.2	Doppelschichtkondensatoren	267
9.4	Weitere Möglichkeiten der Energieversorgung	270
9.5	Konkurrenz oder Kooperation: Hybridsysteme	272
10	Literatur	275
	Stichwortverzeichnis	277
