

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Begriffe</b>	<b>12</b>
2.1	Akkumulatoren und Batterien . . . . .	13
2.2	Der Aufbau eines Akkus . . . . .	13
2.3	Separator . . . . .	14
2.4	Kompakte Akkus . . . . .	14
2.5	Gehäuse und Bauformen . . . . .	15
2.6	Elektroden . . . . .	16
2.7	Spannungen . . . . .	16
2.8	Innenwiderstand . . . . .	17
2.9	Kapazität . . . . .	18
2.9.1	Einfluß des Entladestromes . . . . .	18
2.9.2	Nicht-konstanter Entladestrom . . . . .	21
2.10	Energiedichte . . . . .	21
2.11	Relative Stromstärke . . . . .	23
2.12	Entladen . . . . .	23
2.13	Stofftransport . . . . .	24
2.14	Ladezustand . . . . .	25
2.14.1	Zellenspannung . . . . .	25
2.14.2	Ladungsbilanzierung . . . . .	26
2.14.3	Weitere Verfahren . . . . .	27
2.15	Ladeverfahren . . . . .	27
2.15.1	Ladephasen . . . . .	28
2.15.2	Ladekennlinien . . . . .	28
2.15.3	Impulsladung . . . . .	30
2.15.4	Beenden der Ladung . . . . .	30
2.15.5	Wirkungsgrad der Ladung . . . . .	31
2.15.6	Welligkeit des Ladestromes . . . . .	32
2.15.7	Elektronische Ladegeräte . . . . .	32
2.15.8	Einwegbatterien laden? . . . . .	33
2.16	Verwendungsprofile . . . . .	34
2.17	Parallel- und Serienschaltung . . . . .	35

2.18 Zellenbalance bei Serienschaltung . . . . .	36
2.19 Lebensdauer . . . . .	39
2.20 Alterung . . . . .	39
2.20.1 Mechanische Belastung . . . . .	39
2.20.2 Bildung von Dendriten . . . . .	40
2.20.3 Verlust von Wasser . . . . .	40
2.20.4 Chemische Zersetzung . . . . .	40
2.20.5 Innere Oberfläche . . . . .	41
2.20.6 Die Ostwald-Reifung . . . . .	41
2.20.7 Unvollständige Reaktionen . . . . .	41
2.20.8 Selbstbeschleunigende Überhitzung . . . . .	42
<b>3 Bleigel- und AGM-Akkumulatoren</b> . . . . .	<b>43</b>
3.1 Grundlagen . . . . .	45
3.1.1 Die Hauptreaktion des Bleiakkus . . . . .	45
3.1.2 Der Sauerstoffkreislauf . . . . .	46
3.1.3 Elektrolyt und Separator . . . . .	47
3.1.4 Stromableiter . . . . .	48
3.1.5 Positive Elektrode . . . . .	49
3.1.6 Negative Elektrode . . . . .	49
3.1.7 Selbstbeschleunigende Überhitzung . . . . .	50
3.2 Entladen . . . . .	50
3.2.1 Innenwiderstand . . . . .	51
3.2.2 Entladekennlinien . . . . .	51
3.2.3 Erholung durch Diffusion . . . . .	53
3.2.4 Ladezustand . . . . .	53
3.2.5 Verfügbare Kapazität . . . . .	54
3.2.6 Tiefentladung . . . . .	54
3.3 Lagerung . . . . .	55
3.4 Selbstentladung . . . . .	55
3.5 Lebensdauer und Alterung . . . . .	56
3.5.1 Verlust von Wasser . . . . .	57
3.5.2 Sulfatierung . . . . .	57
3.5.3 Säureschichtung . . . . .	58
3.5.4 Tiefe der Entladung . . . . .	60
3.5.5 Ladezustand . . . . .	61
3.5.6 Ladeverfahren . . . . .	61
3.5.7 Gitterkorrosion . . . . .	62
3.5.8 Temperatur . . . . .	63
3.5.9 Gebrauchte Bleigelakkus . . . . .	63
3.6 Ladeverfahren . . . . .	63
3.6.1 Ladung mit IU-Kennlinie . . . . .	64
3.6.2 Spannung bei IU-Ladung . . . . .	64
3.6.3 Erhaltungsladung . . . . .	65

3.7	Regenerieren . . . . .	66
3.7.1	Tiefentladene Bleigelakkus . . . . .	66
3.7.2	Sulfatierte Akkumulatoren . . . . .	66
3.8	Zellenbalance bei Serienschaltung . . . . .	67
3.9	Geeignete Ladegeräte . . . . .	67
3.9.1	Ein Ladegerät mit dem L200 . . . . .	68
3.9.2	Ladeschaltungen mit UC2906 und UC2909 . . . . .	69
3.10	Sicherheit . . . . .	70
3.11	Verhalten bei Kälte . . . . .	70
3.12	LiFePO <sub>4</sub> -Akkus als Ersatz . . . . .	71
3.13	Zusammenfassung . . . . .	71
3.13.1	Vorteile . . . . .	71
3.13.2	Nachteile und Probleme . . . . .	72
3.13.3	Entladen . . . . .	72
3.13.4	Ladung . . . . .	73
3.13.5	Lange Lebensdauer . . . . .	74
3.13.6	Sicherheit . . . . .	75
4	<b>NiCd- und NiMH-Akkumulatoren</b> . . . . .	76
4.1	Grundlagen . . . . .	78
4.1.1	Die Nickelelektrode . . . . .	78
4.1.2	Die Cadmiumelektrode . . . . .	82
4.1.3	Die MH-Elektrode . . . . .	82
4.1.4	Separator und Elektrolyt . . . . .	83
4.1.5	Die Hauptreaktion im NiCd-Akku . . . . .	84
4.1.6	Die Hauptreaktion im NiMH-Akku . . . . .	84
4.1.7	Der Sauerstoffkreislauf . . . . .	84
4.1.8	Reaktionen bei der Selbstentladung . . . . .	85
4.1.9	Reduzierte Selbstentladung . . . . .	86
4.1.10	Temperaturänderung . . . . .	87
4.1.11	Spannungsverlauf bei der I-Ladung . . . . .	88
4.2	Entladen . . . . .	89
4.2.1	Innenwiderstand . . . . .	89
4.2.2	Entladekennlinie bei NiMH-Akkus . . . . .	90
4.2.3	Entladekennlinie bei NiCd-Akkus . . . . .	92
4.2.4	Verfügbare Kapazität . . . . .	92
4.2.5	Erholung durch Diffusion . . . . .	94
4.2.6	Ladezustand . . . . .	94
4.2.7	Tiefentladung . . . . .	95
4.3	Selbstentladung . . . . .	95
4.3.1	Akkus bisheriger Bauart . . . . .	96
4.3.2	Akkus mit reduzierter Selbstentladung . . . . .	96
4.3.3	Alkali-Mangan-Batterien als Alternative . . . . .	97
4.4	Lagerung . . . . .	97

4.5	Lebensdauer und Alterung . . . . .	98
4.5.1	Temperatur . . . . .	98
4.5.2	Geeignete Ladeverfahren . . . . .	98
4.5.3	Tiefe der Entladung . . . . .	99
4.6	Der Memory-Effekt . . . . .	99
4.6.1	Ursachen . . . . .	99
4.6.2	Heutige Akkus . . . . .	101
4.6.3	Konsequenzen . . . . .	101
4.7	Zellenbalance bei Serienschaltung . . . . .	102
4.8	Ladeverfahren . . . . .	103
4.8.1	Laden mit I-Kennlinie . . . . .	104
4.8.2	Schnellladung . . . . .	104
4.8.3	Wirkungsgrad der Ladung . . . . .	106
4.8.4	Gezielte Überladung . . . . .	106
4.8.5	Sicherheit . . . . .	107
4.9	Geeignete Ladegeräte . . . . .	107
4.9.1	Ladegeräte mit dem U2402B . . . . .	107
4.9.2	Ablauf der Schnellladung . . . . .	107
4.9.3	Lineare Stromregelung mit einem Transistor . . . . .	109
4.9.4	Phasenanschnittsteuerung . . . . .	110
4.9.5	Stromstabilisierung mit einem Schaltregler . . . . .	112
4.10	Optimieren von Akkus . . . . .	112
4.10.1	Auswahl gleicher Akkus . . . . .	112
4.10.2	Das optimale Alter . . . . .	113
4.10.3	Optimieren der Ladung . . . . .	113
4.10.4	Optimieren der Entladung . . . . .	113
4.11	Akkus regenerieren . . . . .	114
4.12	NiCd-Akkus ersetzen . . . . .	114
4.13	Bauformen und deren Bezeichnung . . . . .	115
4.14	Zusammenfassung . . . . .	115
4.14.1	Vorteile . . . . .	118
4.14.2	Nachteile . . . . .	118
4.14.3	Ersatz für Einwegbatterien . . . . .	118
4.14.4	Entladen . . . . .	119
4.14.5	Ladung . . . . .	119
4.14.6	Lange Lebensdauer . . . . .	120
4.14.7	Sicherheit . . . . .	120
5	<b>Lithiumionen- und -polymerakkumulatoren</b>	121
5.1	Batterien mit Lithium . . . . .	122
5.1.1	Nicht wiederaufladbare Lithiumbatterien . . . . .	122
5.1.2	Lithiummetallakkus . . . . .	123
5.1.3	Lithiumionenakkus . . . . .	123
5.2	Grundlagen . . . . .	124

5.2.1	Die Hauptreaktion im Lithiumionenakku . . . . .	125
5.2.2	Negative Elektrode . . . . .	126
5.2.3	Positive Elektrode . . . . .	128
5.2.4	Elektrolyt . . . . .	131
5.2.5	Separator . . . . .	132
5.2.6	Lithiumpolymerakkus . . . . .	133
5.3	Entladen . . . . .	134
5.3.1	Entladekennlinien . . . . .	134
5.3.2	Kapazität . . . . .	137
5.3.3	Innenwiderstand . . . . .	138
5.3.4	Erholung durch Diffusion . . . . .	138
5.3.5	Ladezustand . . . . .	139
5.3.6	Tiefentladung . . . . .	139
5.4	Ladung . . . . .	139
5.4.1	Ladeverfahren . . . . .	140
5.4.2	Überladung . . . . .	140
5.5	Lebensdauer und Alterung . . . . .	142
5.5.1	Entladetiefe . . . . .	144
5.5.2	Ladezustand . . . . .	144
5.5.3	Temperatur . . . . .	145
5.5.4	Ladeverfahren . . . . .	145
5.5.5	Beschädigte Gehäuse . . . . .	145
5.5.6	Nebenreaktionen . . . . .	145
5.6	Selbstentladung und Lagerung . . . . .	146
5.7	Zellenbalance bei Serienschaltung . . . . .	147
5.8	Sicherheit . . . . .	148
5.8.1	Ladung . . . . .	149
5.8.2	Entladung . . . . .	149
5.8.3	Mechanische Beschädigung . . . . .	150
5.9	Geeignete Ladegeräte . . . . .	150
5.9.1	Ladegeräte mit dem IC MAX1758 . . . . .	150
5.9.2	Ablauf der Ladung . . . . .	151
5.9.3	Die externe Verdrahtung . . . . .	152
5.10	Bauformen und deren Bezeichnung . . . . .	152
5.10.1	Normen und Bezeichnung . . . . .	152
5.10.2	Kundenspezifische Akkus . . . . .	152
5.11	Zusammenfassung . . . . .	154
5.11.1	Vorteile . . . . .	154
5.11.2	Nachteile und Probleme . . . . .	155
5.11.3	Entladen . . . . .	155
5.11.4	Ladung . . . . .	155
5.11.5	Lange Lebensdauer . . . . .	156
5.11.6	Sicherheit . . . . .	157

<b>6 Doppelschichtkondensatoren als Energiespeicher</b>	<b>159</b>
6.1 Grundlagen . . . . .	160
6.1.1 Kondensatoren . . . . .	160
6.1.2 Doppelschichtkondensatoren . . . . .	162
6.2 Eigenschaften . . . . .	164
6.2.1 Laden und Entladen . . . . .	164
6.2.2 Kapazität . . . . .	166
6.2.3 Lebensdauer . . . . .	166
6.2.4 Maximale Spannung . . . . .	166
6.2.5 Selbstentladung . . . . .	167
6.3 Anwendungsgebiete und Bauformen . . . . .	167
6.4 Pufferung für Akkus . . . . .	168
6.5 Spannungsausgleich . . . . .	169
<b>7 Analyse des Zustandes von Akkumulatoren</b>	<b>170</b>
7.1 Impedanz . . . . .	171
7.1.1 Impedanzspektroskopie . . . . .	171
7.1.2 Ersatzschaltbilder . . . . .	173
7.1.3 Diffusion . . . . .	174
7.1.4 Auswertung von Impedanzkurven . . . . .	175
7.2 Messung des Innenwiderstandes . . . . .	175
7.2.1 Messung mit Wechselspannung . . . . .	175
7.2.2 Messung mit Gleichstromimpulsen . . . . .	176
7.2.3 Unterschiede . . . . .	176
7.3 Elektrochemisches Rauschen . . . . .	177
<b>8 Akkumulatoren richtig anschließen</b>	<b>179</b>
8.1 Anschluß durch Löten . . . . .	180
8.2 Batteriehalter . . . . .	180
8.3 Schraubanschlüsse und Flachstecker . . . . .	181
8.4 Kontaktflächen . . . . .	182
8.5 Stecker und Buchsen . . . . .	182
8.6 Sicherungen . . . . .	182
8.7 Kontakte reinigen . . . . .	184
<b>9 Sicherheit und Erste Hilfe</b>	<b>185</b>
9.1 Unfälle mit Bleigelakkus . . . . .	186
9.2 Unfälle mit NiCd- und NiMH-Akkus . . . . .	186
9.3 Unfälle mit Lithiumionenakkus . . . . .	188
9.4 Explosionsgefahr . . . . .	189
9.5 Brandgefahr . . . . .	190
9.6 Gefahren durch Kurzschluß . . . . .	190
<b>10 Akkumulatoren im Amateurfunk</b>	<b>191</b>
10.1 Tragbare Geräte . . . . .	192

---

10.2 Lithiumionenakkus . . . . .	193
10.3 Portabelbetrieb . . . . .	193
10.4 Wärme und Kälte . . . . .	194
10.5 Notfunk . . . . .	194
<b>11 Akkumulatoren in Digitalkameras</b>	<b>195</b>
11.1 NiMH-Akkus . . . . .	196
11.2 Lithiumionenakkus . . . . .	196
11.3 Lebensdauer . . . . .	197
11.4 Sicherheit . . . . .	197
11.5 Einwegbatterien als Reserve . . . . .	198
<b>12 Akkumulatoren an Bord von Yachten</b>	<b>199</b>
12.1 Bleiakkumulatoren . . . . .	200
12.2 Ladung . . . . .	200
12.3 Lebensdauer . . . . .	201
12.4 Ladezustand und Kapazität . . . . .	201
12.5 Sicherheit . . . . .	202
<b>13 Akkumulatoren im Modellbau</b>	<b>203</b>
13.1 Ladezustand . . . . .	204
13.2 Optimierung . . . . .	204
13.3 Lebensdauer . . . . .	205
<b>14 Akkumulatoren für tragbare Computer</b>	<b>206</b>
<b>15 Akkus für Mobiltelefone und Unterhaltungselektronik</b>	<b>208</b>
<b>16 Reparieren, entsorgen und wiederverwerten</b>	<b>210</b>
16.1 Akkusätze regenerieren und reparieren . . . . .	211
16.1.1 Bleigelakkus . . . . .	211
16.1.2 NiCd- und NiMH-Akkus . . . . .	211
16.1.3 Lithiumionenakkus . . . . .	211
16.2 Die Rücknahme von Akkus und Batterien . . . . .	212
16.3 Statistische Ergebnisse . . . . .	212
16.4 Verfahren zur Wiederverwertung . . . . .	213
16.4.1 Bleiakkumulatoren . . . . .	213
16.4.2 NiCd-Akkus . . . . .	214
16.4.3 NiMH-Akkus . . . . .	214
16.4.4 Lithiumionenakkus . . . . .	214
16.5 Kosten der Rücknahme . . . . .	215
16.6 Nutzen der Verwertung . . . . .	215
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>215</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>232</b>