

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Energiewandlung	1
1.1	Netzstabilisierung mit Speichern	1
1.1.1	Speicherbedarf	1
1.1.2	Lastprofilwlzung und Regelenergie	2
1.1.3	Lastmanagement	4
1.2	Politische und rechtliche Rahmenbedingungen	4
1.3	Varianten der Energiespeicherung	5
1.4	Mechanische Speicher	7
1.4.1	Pumpspeicher	7
1.4.2	Druckluftspeicher	8
1.4.3	Schwungradspeicher	8
1.5	Thermische Speicher	11
1.5.1	Grundsätzliche Verluste der Energiewandlung	11
1.5.2	Reaktionswrmespeicher	13
1.5.3	Innere-Energie-Speicher	14
1.5.4	Thermoelektrische Speicher	15
1.5.5	Latentwärmespeicher	15
1.6	Elektrische Energiespeicher	17
1.7	Chemische Speicher	20
1.8	Systemvergleich	21
	Literatur	21
2	Doppelschichtkondensatoren	23
2.1	Die elektrolytische Doppelschicht als Energiespeicher	23
2.1.1	Von der Leidener Flasche zum Superkondensator	23
2.1.2	Bindeglied zwischen Kondensatoren und Batterien	25
2.1.3	Energie und Leistung idealer Kondensatoren	26
2.1.4	Leistungsdaten kommerzieller Bauteile	31
2.1.5	Zelldesign für höhere Spannungen	33
2.1.6	Technische Anwendungen	34

2.2	Wesen und Modelle der Doppelschichtkapazität	35
2.2.1	Das elektrostatische Helmholtz-Modell	36
2.2.2	Der Helmholtz'sche Doppelschichtkondensator	36
2.2.3	Das Stern-Modell	39
2.2.4	Differentielle Kapazität oder Pseudokapazität	40
2.3	Kohlenstofftechnologie	44
2.3.1	Pseudokapazität von Aktivkohle	46
2.3.2	Physikalisch-chemische Eigenschaften von Aktivkohle	53
2.3.3	Technische Kohlenstoffmaterialien	63
2.3.4	Elektrodenfabrikation	73
2.4	Elektrolyte	81
2.4.1	Wässrige Elektrolytlösungen	81
2.4.2	Nichtwässrige Systeme	82
2.4.3	Ionische Flüssigkeiten	86
2.4.4	Festelektrolyte	87
2.5	Separator	88
2.6	Metalloxidtechnologie	89
2.6.1	Meilensteine reversibler Metalloxidspeicher	89
2.6.2	Rutheniumdioxid	90
2.6.3	Iridiumdioxid	97
2.6.4	Gemischte Metalloxide	97
2.6.5	Andere Klassen von Oxiden und Elektrodenmaterialien	98
2.7	Polymertechnologie	100
2.7.1	Pseudokapazität leitfähiger Polymere	100
2.7.2	Praktische Leistungsdaten von Polymerkondensatoren	105
2.8	Hybridtechnologie	106
2.8.1	Asymmetrische Kondensatoren	106
2.8.2	Kohlenstoff-Metalloxid-Hybridkondensatoren	107
2.8.3	Kohlenstoff-Lithium-Hybridkondensatoren	109
2.8.4	Metalloxid-Elektrolytkondensator-Hybride	110
2.8.5	Polymer-Elektrolytkondensator-Hybride	112
2.9	Praktische Kapazitätsmessung	113
2.9.1	Entladen mit konstantem Strom	113
2.9.2	Entladung mit konstanter Leistung	119
2.9.3	Laden und Entladen mit einer Spannungsrampe	120
2.9.4	Entladung mit Messwiderstand	122
2.9.5	Laden mit konstanter Spannung (Chronoamperometrie)	122
2.10	Betriebsverhalten von Doppelschichtkondensatoren	124
2.10.1	Frequenzgang von Kapazität und Widerstand	124
2.10.2	Spannungsabhängigkeit der Kapazität	126
2.10.3	Temperaturabhängigkeit der Kapazität	126
2.10.4	Leckstrom	127

2.10.5 Selbstentladung	127
2.10.6 Reversibilität und Lebensdauer	128
2.11 Modellierung von Doppelschichtkondensatoren	128
2.11.1 Einfache RC-Reihenschaltung	129
2.11.2 RC-Schaltung mit Leckstromwiderstand und Induktivität	130
2.11.3 Empirische Kapazität praktischer Kondensatoren	133
2.11.4 Komplexe Kapazität realer Dielektrika	133
2.11.5 Konstantphasenelement (CPE)	134
2.11.6 Kettenleiter	135
2.12 Alterung	138
2.12.1 Stabilität des Elektrolyten	138
2.12.2 Alterung der Elektrodenmaterialien	141
2.12.3 Abschätzung der Lebensdauer	142
2.12.4 Fehlerbild im Langzeittest	145
2.12.5 Zuverlässigkeit	145
2.13 Sicherheit, Nachhaltigkeit und Kosten	148
2.13.1 Überhitzung	148
2.13.2 Diagnose- und Überwachungskonzepte	148
2.13.3 Marktvolumen und Kosten	149
2.13.4 Nachhaltigkeit	150
2.13.5 Rechtliche Einschränkungen	151
Literatur	152
3 Lithiumionen-Batterien	157
3.1 Energiespeicherung in Lithiumionen-Akkumulatoren	157
3.1.1 Zellchemie	157
3.1.2 Meilensteine zu modernen Lithiumbatterien	164
3.2 Stand der Technik	166
3.2.1 Anforderungen an moderne Lithiumbatterien	166
3.2.2 Batteriehersteller	166
3.3 Negative Elektrodenmaterialien (Anoden)	168
3.3.1 Materialübersicht	168
3.3.2 Grafit und amorpher Kohlenstoff	170
3.3.3 Lithiumtitanat-Interkalationselektrode (LTO)	175
3.3.4 Lithiumlegierungen	176
3.3.5 Reduzierbare Übergangsmetalloxide	179
3.3.6 Lithium-Metall-Nitride	179
3.4 Positive Elektrodenmaterialien (Kathoden)	181
3.4.1 Materialübersicht	181
3.4.2 Übergangsmetalloxide	182
3.4.3 Lithiumeisenphosphat (LFP) und Polyoxyanionen	193
3.4.4 Gemischte und ungeordnete Materialien	196
3.4.5 Die „alten“ Übergangsmetallsulfide	197

3.5	Elektrolyte	197
3.5.1	Flüssige Elektrolyte	200
3.5.2	Ionische Flüssigkeiten	205
3.5.3	Elektrolytadditive	206
3.5.4	Polymerelektrolyte und Gele	210
3.5.5	Anorganische Festelektrolyte	214
3.6	Separator	214
3.7	Zell- und Batteriedesign	216
3.7.1	Stromableiter	217
3.7.2	Flachzellen	218
3.7.3	Dünnschichtbatterien	218
3.7.4	Herstellung von Lithiumionen-Batterien	219
3.8	Leistungsdaten, Lebensdauer und Alterung	222
3.8.1	Energie- und Leistungsdichte	222
3.8.2	Kapazität und dynamisches Verhalten	225
3.8.3	Wirkungsgrad	226
3.8.4	Lade-Entlade-Kurve	227
3.8.5	Selbstentladung und Lagerung	229
3.8.6	Lebensdauer und Alterung	230
3.9	Typische Anwendungen	230
3.9.1	Konsumelektronik	231
3.9.2	Intelligente Energieversorgung	231
3.9.3	Anforderungen an Antriebsbatterien	232
3.10	Sicherheit, Nachhaltigkeit und Kosten	234
3.10.1	Diagnose- und Überwachungskonzepte	234
3.11	Marktvolumen und Kosten	242
3.11.1	Materialaufwand	242
3.11.2	Nachhaltigkeit	245
	Literatur	250
4	Traktions- und Speicherbatterien: Blei, Nickel, Natrium	255
4.1	Bleiakkumulator	255
4.1.1	Zellchemie	255
4.1.2	Verschlossene Blei-Säure-Batterien (VRLA)	257
4.1.3	Elektroden und Zelldesign	258
4.1.4	Betriebsverhalten	260
4.1.5	Batteriemanagement	264
4.1.6	Nachhaltigkeit	265
4.1.7	Anwendungen	265
4.2	Alkalische Batterien	266
4.2.1	Nickel-Cadmium-Akkumulator	266
4.2.2	Nickel-Metallhydrid-Akkumulator (NiMH)	274

4.3	Hochtemperatur-Natrium-Batterien	280
4.3.1	Natrium-Nickelchlorid-Akkumulator (Zebra-Batterie)	280
4.3.2	Natrium-Schwefel-Akkumulator	285
	Literatur	289
5	Hochenergiebatterien nach Lithium-Ion	291
5.1	Visionäre Zellchemie	291
5.2	Lithium-Luft-Akkumulatoren	292
5.2.1	Trockene und nichtwässrige Lithium-Luft-Systeme	292
5.2.2	Wässrige Lithium-Luft-Systeme	296
5.2.3	Anodische Lithiumauflösung (negative Elektrode)	299
5.2.4	Kathodische Sauerstoffreduktion (positive Elektrode)	301
5.3	Metall-Luft-Batterien außer Lithium	302
5.3.1	Prinzip der Metall-Luft-Batterie	302
5.3.2	Natrium-Luft-Batterie	304
5.3.3	Magnesium-Luft-Batterie	305
5.3.4	Aluminium-Luft-Batterie	305
5.3.5	Eisen-Luft-Batterie	305
5.3.6	Zink-Luft-Batterie	306
5.4	Metall-Schwefel-Batterien	308
5.4.1	Lithium-Schwefel-Akkumulator	308
5.4.2	Magnesium-Schwefel-Batterie	317
5.5	Metallionen-Batterien außer Lithium	318
5.5.1	Natriumionen-Batterie	318
5.5.2	Magnesiumionen-Batterie	322
5.6	Festkörperbatterien	326
5.6.1	Vorteile von Festelektrolyten	326
5.6.2	Anorganische Festelektrolyte	328
5.7	Halogenidbatterien	330
5.7.1	Fluoridbatterie	330
5.7.2	Chloridbatterie	332
5.7.3	Dual-Ionen-Batterien	333
5.8	Übergangsmetallate	333
5.8.1	Zellchemie	333
5.8.2	Elektrodenmaterialien	333
5.9	Energiespeicherung in chemischen Reaktionen	334
5.9.1	Energiespeicherung ohne Interkalation	334
5.9.2	Leistungsdaten	335
5.9.3	Reaktionskinetik	336
	Literatur	336