

# Energiespeicher

Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen

Univ.-Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. Erich Rummich

Mit 94 Bildern und 22 Tabellen

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Einige Begriffe aus dem Bereich der Energie . . . . .	2
1.2	Begriffe zu Energiewandlungsanlagen . . . . .	3
1.3	Aufgaben von Energiespeichern . . . . .	4
1.4	Einteilungsmöglichkeiten der Energiespeicher . . . . .	5
1.4.1	Kenngößen von Energiespeichern . . . . .	6
1.4.2	Nutzung erneuerbarer Energien und Energiespeicherung	6
1.4.2.1	Speichermöglichkeiten für elektrische Energie . . . . .	7
1.4.3	Dezentrale Energieversorgung und Energiespeicherung . . . . .	7
1.5	Carbon Management . . . . .	8
1.5.1	Speicherung von Kohlendioxid . . . . .	9
1.6	Nachhaltigkeit . . . . .	9
1.7	Grundgrößen und Einheiten . . . . .	11
1.7.1	Weitere Grundgrößen . . . . .	11
1.7.2	Weitere häufig verwendete Einheiten . . . . .	13
1.7.3	Bezeichnungen für Vielfache und Teile von Einheiten . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Luft als Speichermedium</b>	<b>15</b>
2.1	Einführende Grundlagen . . . . .	15
2.1.1	Einige Betrachtungen über ideale Gase . . . . .	15
2.1.2	Einige Grundlagen aus der Wärmelehre . . . . .	17
2.1.2.1	1. Hauptsatz der Wärmelehre . . . . .	17
2.1.2.2	Hauptgleichungen der Wärmelehre . . . . .	18
2.1.2.3	2. Hauptsatz der Wärmelehre . . . . .	18

2.1.3	Carnot-Prozess . . . . .	19
2.1.3.1	Exergie . . . . .	20
2.1.4	Isochore Abkühlung . . . . .	21
2.1.4.1	Exergieverlust in einem Gasspeicher . . . . .	21
2.1.5	Energie, Energiedichte, Exergiewirkungsgrad eines Gasspeichers . . . . .	22
2.2	Druckluft als Speichermedium . . . . .	23
2.2.1	Speicher für Druckluft . . . . .	24
2.2.1.1	Gleichdruckspeicher . . . . .	24
2.2.1.2	Gleitdruckspeicher . . . . .	24
2.2.1.3	Großspeicher für Druckluft . . . . .	24
2.2.2	Anwendungen von Luftspeichern im MW-Bereich . . . . .	25
2.2.2.1	Luftspeicher- Gasturbinenanlage Huntorf . . . . .	26
2.2.2.2	Gasturbinen-Kraftwerk . . . . .	26
2.2.2.3	Joule-Prozess . . . . .	27
2.2.2.4	Anlage Huntorf . . . . .	28
2.2.2.5	Kenngrößen für CAES - Anlagen . . . . .	30
2.2.3	Varianten zu Huntorf . . . . .	30
2.2.3.1	Pneumatisches Speicherkraftwerk . . . . .	31
2.2.3.2	Nutzung von Schwachgas aus der Nordsee . . . . .	32
2.3	Weitere Anwendungen von Druckluftspeichern . . . . .	32
2.3.1	Druckluftauto . . . . .	32
2.3.2	Druckluftspeichersystem mit Hydraulik- und Pneumatik-Komponenten . . . . .	33
2.4	Hydrospeicher . . . . .	34
2.4.1	Bauformen, Wirkungsweise . . . . .	34
2.4.2	Einsatzmöglichkeiten von Hydrospeichern . . . . .	35
2.4.3	Kennlinien, Kenngrößen . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Wasserstoff als Energieträger und seine Speicherung</b>	<b>39</b>
3.1	Wasserstoff als Energieträger . . . . .	39
3.2	Technische Prozesse zur Herstellung von Wasserstoff . . . . .	40
3.3	Nachhaltige Gewinnung von Wasserstoff . . . . .	40
3.3.1	Verfahren auf Basis der Photolyse . . . . .	41
3.3.2	Elektrolyseverfahren . . . . .	41

3.3.2.1	Alkalische Elektrolyse . . . . .	41
3.3.2.2	Membran-Elektrolyse . . . . .	42
3.3.2.3	Hochtemperatur-Elektrolyse . . . . .	42
3.3.3	Thermochemische Wasserspaltung . . . . .	43
3.3.4	Wasserstoff aus Biomasse . . . . .	44
3.3.4.1	Biogasreaktor . . . . .	44
3.3.4.2	Wirbelschicht-Vergasung . . . . .	44
3.3.4.3	Verfahren zur Trennung von H <sub>2</sub> und CO <sub>2</sub> . . . . .	45
3.4	Speicherung von Wasserstoff . . . . .	45
3.4.1	Druckgasbehälter . . . . .	45
3.4.1.1	Hochdruckflaschen . . . . .	45
3.4.2	Metallhydridspeicher (MH-Speicher) . . . . .	46
3.4.2.1	Thermische Energiespeicherung mit Hilfe von Metallhydriden . . . . .	47
3.4.3	Methylcyclohexan-Speicher . . . . .	47
3.4.4	Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nanotubes) . . . . .	49
3.4.5	Fulleren-Speicher . . . . .	49
3.4.6	Glas-Mikrokugeln (Glass Microspheres) . . . . .	49
3.4.7	Kryogene Speicherung . . . . .	50
3.4.7.1	Adsorption an Aktivkohle . . . . .	50
3.4.8	Verflüssigung von H <sub>2</sub> (LH <sub>2</sub> ) . . . . .	50
3.4.8.1	Linde-Verflüssigungsverfahren . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Gasförmige Kohlenwasserstoffe und deren Speicherung</b>	<b>53</b>
4.1	Speicherung von Erdgas (Methan) . . . . .	53
4.1.1	Oberirdische Speicher . . . . .	54
4.1.2	Untertagegasspeicherung . . . . .	54
4.1.2.1	Porenspeicher . . . . .	55
4.1.2.2	Aquiferspeicher . . . . .	55
4.1.2.3	Lade- und Entladestation . . . . .	55
4.1.3	Verflüssigung von Erdgas (LNG) . . . . .	56
4.1.4	Unkonventionelle Speicherung von Erdgas . . . . .	57
4.1.4.1	Kryogene Methanabsorption in Flüssiggas . . . . .	57
4.1.4.2	Hydratation von Erdgas . . . . .	58
4.1.4.3	Natürliche Hydratvorkommen . . . . .	58

4.1.5	Erdgasspeicher für den mobilen Einsatz . . . . .	59
4.1.6	Mobile Adsorptionsspeicher . . . . .	60
4.2	Flüssiggas . . . . .	61
4.2.1	Verwendung und Speicherung von Flüssiggas . . . . .	61
4.3	Biogas . . . . .	62
4.3.1	Reinigung von Biogas . . . . .	64
4.3.1.1	Druckwasserwäsche (Water Scrubber System)	64
4.3.1.2	Druckwechselverfahren (PSA, Pressure Swing Adsorption)	64
4.3.1.3	LPCoab-System (Low Pressure CO <sub>2</sub> Absorption)	64
<b>5</b>	<b>Speicherung von flüssigen und festen Energieträgern</b>	<b>67</b>
5.1	Speicherung von Öl . . . . .	67
5.1.1	Speicher für Rohöl . . . . .	67
5.2	Speicherung von konventionellen Kraftstoffen . . . . .	68
5.3	Pflanzenöl als Energieträger und seine Speicherung . . . . .	69
5.3.1	Herstellung von Pflanzenöl . . . . .	69
5.3.2	Lagerung (Speicherung) von Pflanzenöl . . . . .	70
5.4	Lagerung (Speicherung) von festen Energieträgern . . . . .	71
5.4.1	Haldenlagerung . . . . .	71
5.4.1.1	Lagerung von Kohle . . . . .	71
5.4.1.2	Hallen- und Bunkerlagerung . . . . .	71
5.4.2	Lagerung (Speicherung) von fester Biomasse . . . . .	72
5.4.2.1	Lagerung von Holz und Holzprodukten . . . . .	72
5.4.2.2	Lagerung von Stroh . . . . .	72
<b>6</b>	<b>Thermische Energiespeicherung</b>	<b>75</b>
6.1	Einführende Grundlagen . . . . .	76
6.1.1	Wärmetransport . . . . .	77
6.1.1.1	Wärmeleitung . . . . .	77
6.1.1.2	Wärmeübertragung (-transport) durch Konvektion . . . . .	77
6.1.1.3	Wärmestrahlung . . . . .	79

6.1.2	Wärmetauscher . . . . .	79
	6.1.2.1 Gegenstromwärmetauscher . . . . .	79
	6.1.2.2 Gleichstromwärmetauscher . . . . .	79
6.1.3	Erwärmungsgleichung, thermische Zeitkonstante . . . .	81
6.2	Sensible (fühlbare) Wärmespeicherung . . . . .	83
	6.2.1 Flüssige Speichermedien . . . . .	84
	6.2.1.1 Mengenspeicher . . . . .	84
	6.2.1.2 Schichtenspeicher . . . . .	85
	6.2.1.3 Anwendungen für kurze Speicherdauer . . . . .	88
	6.2.2 Elektrothermische Energiespeicherung . . . . .	90
	6.2.2.1 Elektro-Warmwasserspeicher . . . . .	90
	6.2.2.2 Elektrowärmespeicher für Heizzwecke . . . . .	91
	6.2.2.3 Elektro-Heißwasserspeicher . . . . .	91
	6.2.3 Pufferspeicher . . . . .	92
	6.2.4 Sensible Wärmespeicher mit Feststoffen . . . . .	92
	6.2.5 Wärmespeicher mit großem Volumen . . . . .	93
	6.2.5.1 Großwärmespeicher mit Wasser als Speicher- medium . . . . .	93
	6.2.6 Aquiferspeicher . . . . .	95
	6.2.6.1 Hydrogeologische Voraussetzungen . . . . .	96
6.3	Latente Wärmespeicherung . . . . .	97
	6.3.1 Grundlagen der latenten Wärmespeicherung . . . . .	97
	6.3.1.1 Clausius-Clapeyronsche Gleichung . . . . .	98
	6.3.2 Anforderungen an Latentspeichermaterialien . . . . .	99
	6.3.3 Ausführungen von Latentwärmespeichern . . . . .	101
	6.3.4 Anwendungsbeispiele . . . . .	102
	6.3.4.1 Latentspeicher zur Klimatisierung . . . . .	103
	6.3.4.2 Einsatz im mobilen Bereich . . . . .	103
6.4	Dampfspeicherung . . . . .	103
	6.4.1 Grundlagen der Dampfspeicherung . . . . .	104
	6.4.1.1 Verdampfungsvorgang im T,s-Diagramm . . .	105
	6.4.2 Dampf-Heißwasserspeicher . . . . .	108

6.4.3	Ruthsspeicher . . . . .	108
6.4.3.1	Ladevorgang beim Ruthsspeicher . . . . .	108
6.4.3.2	Entladevorgang beim Ruthsspeicher . . . . .	108
6.5	Thermochemische Wärmespeicher . . . . .	109
6.5.1	Heterogenverdampfung . . . . .	110
6.5.2	Sorptionsspeicher . . . . .	111
6.5.2.1	Offener Sorptionsspeicher zur Klimatisierung von Gebäuden . . . . .	112
6.5.2.2	Prozeßwärme: Übertragung über große Ent- fernungen und Speicherung . . . . .	113
6.5.2.3	EVA/ADAM Transport- und Speichersystem . . . . .	114
<b>7</b>	<b>Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke</b>	<b>117</b>
7.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	118
7.2	Bauformen und ausgewählte Beispiele . . . . .	120
7.2.1	Bauformen . . . . .	120
7.2.2	Pumpspeicher-Kraftwerksprojekte . . . . .	121
7.2.2.1	Pumpspeicherkraftwerk Limberg II (A) . . . . .	121
7.2.2.2	Pumpspeicher-Kraftwerksanlage Linthal (CH) . . . . .	121
7.2.2.3	Pumpspeicher-Kraftwerksanlage Goldisthal (D) . . . . .	122
7.2.3	Pumpspeicher-Kleinwasserkraftanlagen . . . . .	122
7.2.4	Matrix-Turbine . . . . .	122
7.3	Gezeitenkraftwerke . . . . .	123
7.3.1	Nutzung von Meeresströmungen zufolge Gezeiten . . . . .	125
<b>8</b>	<b>Federn als Energiespeicher</b>	<b>127</b>
8.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	127
8.1.1	Biegefedern . . . . .	128
8.1.2	Torsionsfeder . . . . .	129
8.2	Arten von Federn . . . . .	130
8.3	Anwendungen und Aufgaben von Federn . . . . .	131
8.4	Analogie zwischen mechanischem und elektrischem Schwingkreis . . . . .	132
8.4.1	Mechanischer Schwingkreis . . . . .	132
8.4.2	Elektrischer Schwingkreis . . . . .	133

<b>9 Schwungradspeicher</b>	<b>135</b>
9.1 Physikalische Grundlagen . . . . .	135
9.1.1 Beanspruchung in einem dünnen rotierenden Ring . . .	136
9.1.2 Energiedichte eines Schwungradspeichers . . . . .	137
9.2 Anwendungen . . . . .	139
9.2.1 Anwendungen im ortsfesten Bereich . . . . .	139
9.2.1.1 Unterbrechungsfreie Stromversorgungen USV .	139
9.2.1.2 Schwungmassenspeicher in Netzen von Stadt- und Nahverkehrsbahnen . . . . .	140
9.2.1.3 Schwungradspeicher zur Spitzenlastdeckung . .	141
9.2.2 Schwungradspeicher im mobilen Einsatz . . . . .	142
9.2.2.1 Gyrobus . . . . .	142
9.2.2.2 Einsatz in dieselektrischen Bussen . . . . .	142
9.2.2.3 Einsatz in Dieseltriebfahrzeugen . . . . .	143
<b>10 Elektrochemische Energiespeicherung</b>	<b>145</b>
10.1 Begriffe und Grundlagen . . . . .	146
10.1.1 Faradaysche Gesetze . . . . .	149
10.1.2 Voltaische Spannungsreihe . . . . .	151
10.1.3 Voltazelle, Voltaelement . . . . .	152
10.2 Batterie- (Zell-) Systeme . . . . .	154
10.2.1 Blei-Säure-Batterie (Pb-Säure-Akku) . . . . .	154
10.2.2 Nickel-Batterien . . . . .	156
10.2.2.1 Nickel-Kadmium-Batterie (Ni-Cd-Akku) . . . .	156
10.2.2.2 Nickel-Eisen-Batterie (Ni-Fe-Akku) . . . . .	157
10.2.2.3 Nickel-Metallhydrid-Batterie (Ni-MH-Akku) .	158
10.2.3 Lithium-Batteriesysteme . . . . .	159
10.2.3.1 Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion-Zelle) . . . . .	160
10.2.3.2 Lithium-Polymer-Zelle (Li-Po-Zelle) . . . . .	161
10.2.3.3 Lithiumtitanat - Lithiumtitanoxid-Batterie . .	162
10.2.4 Hochtemperatur-Batteriesysteme . . . . .	163
10.2.4.1 Natrium-Schwefel-Batterie (Na-S-Zelle) . . . .	163
10.2.4.2 Natrium-Nickelchlorid-Batterie (Na-NiCl <sub>2</sub> -Zelle)	165
10.2.5 Zink-Brom-Batteriesystem (Zn-Br-Zelle) . . . . .	166



10.2.6	Redox-Flow-Batteriesysteme . . . . .	169
10.2.6.1	Vanadium-Redox-Flow-Batterie . . . . .	169
10.2.6.2	Polysulfid-Bromid-Batteriesystem . . . . .	170
10.2.7	Wiederaufladbare Alkali-Mangan-Batterie (Zelle) . . . . .	171
10.2.8	Vergleich einiger Batteriesysteme . . . . .	173
10.3	Einsatz von Batteriesystemen . . . . .	173
10.3.1	Einsatz im mobilen Bereich . . . . .	173
10.3.2	Elektrotraktionsanwendungen . . . . .	174
10.3.3	Hybridantriebe . . . . .	175
10.3.3.1	Serieller Hybridantrieb . . . . .	175
10.3.3.2	Paralleler Hybridantrieb . . . . .	176
10.3.3.3	Leistungsverzweigter Hybridantrieb . . . . .	177
10.3.4	Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) . . . . .	177
10.3.5	Batterieanlage zur Netzspannungsstützung . . . . .	178
10.3.6	Batterieanlagen und Nutzung regenerativer Energiequellen . . . . .	180
10.3.7	Batterieanlagen im MW-Bereich . . . . .	181
10.3.8	Pufferung von Gleichstrom-Bahnen . . . . .	182
10.4	Elektrochemische Speicherung mit Brennstoffzellen . . . . .	182
10.4.1	Brennstoffzellen . . . . .	183
10.4.2	PEM-Brennstoffzelle . . . . .	184

## **11 Energiespeicherung mit Kondensatoren 187**

11.1	Grundlagen des elektrischen Feldes . . . . .	187
11.1.1	Spannung, elektrische Feldstärke, Kraft auf elektrische Ladungen . . . . .	187
11.1.2	Elektrischer Strom . . . . .	189
11.1.3	Elektrischer Widerstand . . . . .	190
11.1.4	Ohmsches Gesetz . . . . .	190
11.1.5	Elektrische Leistung, Arbeit . . . . .	191
11.1.6	Kirchhoff-Regeln . . . . .	191
11.1.6.1	Erste Kirchhoff-Regel . . . . .	191
11.1.6.2	Serienschaltung von Widerständen . . . . .	192
11.1.6.3	Parallelschaltung von Widerständen . . . . .	192
11.1.6.4	Zweite Kirchhoff-Regel . . . . .	192

11.1.7	Elektrische Flussdichte, Ladung, Kondensator . . . . .	193
11.1.8	Kapazität eines Kondensators . . . . .	194
11.1.8.1	Schaltung von Kondensatoren . . . . .	195
11.2	Bauformen von Kondensatoren . . . . .	196
11.2.1	Plattenkondensator . . . . .	196
11.2.2	Elektrolytkondensator . . . . .	197
11.2.3	Doppelschicht-Kondensator (DSK) . . . . .	197
11.3	Kondensator als Energiespeicher . . . . .	199
11.3.1	Laden eines Kondensators . . . . .	199
11.3.2	Energiespeicherung . . . . .	201
11.3.3	Entladen des Kondensators . . . . .	202
11.3.4	Laden und Entladen mit konstantem Strom . . . . .	203
11.3.5	Energieumsetzung, Verluste, maximale Leistungsabgabe . . . . .	204
11.4	Anwendungen von DSK-Kondensatoren . . . . .	205
11.4.1	Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) . . . . .	205
11.4.2	Einsatz im mobilen Bereich . . . . .	205
11.4.3	Netzstabilisierung von elektrischen Nahverkehrssystemen . . . . .	206
<b>12</b>	<b>Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES)</b> . . . . .	<b>207</b>
12.1	Grundlagen des magnetischen Feldes . . . . .	207
12.1.1	Bewegte Ladungen und Magnetfeld . . . . .	207
12.1.2	Magnetfelder durch stromdurchflossene Leiter . . . . .	209
12.1.3	Spulen . . . . .	211
12.1.4	Faradaysches Induktionsgesetz . . . . .	212
12.1.5	Induktivität einer Spule . . . . .	214
12.1.5.1	Selbstinduktion, Lenzsche Regel . . . . .	215
12.1.6	Magnetische Energiedichte, Energie . . . . .	215
12.2	Widerstandsbehaftete Spule . . . . .	216
12.2.1	Einschalten einer (normalleitenden) Spule . . . . .	216
12.2.2	Abschalt- und Entladevorgang einer (normalleitenden) Spule . . . . .	217
12.3	Widerstandslose (supraleitende) Spule . . . . .	218
12.3.1	Ladevorgang des SMES . . . . .	218
12.3.2	Speicherbetrieb des SMES . . . . .	219
12.3.3	Entladevorgang des SMES . . . . .	219

12.4 Supraleitung . . . . .	219
12.4.1 Einteilung der Supraleiter . . . . .	220
12.4.1.1 Supraleiter 1. Art . . . . .	220
12.4.1.2 Supraleiter 2. Art . . . . .	220
12.4.1.3 Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL) . . . . .	221
12.5 Anwendungen von Spulen und SMES . . . . .	221
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>223</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>229</b>