

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
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
2	Luft als Speichermedium	15
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
3	Wasserstoff als Energieträger und seine Speicherung	39
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 ₂ und CO ₂ . . .	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 ₂ (LH ₂)	50
3.4.8.1	Linde-Verflüssigungsverfahren	50
4	Gasförmige Kohlenwasserstoffe und deren Speicherung	53
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	LPCoaab-System (Low Pressure CO ₂ Absorption)	64
5	Speicherung von flüssigen und festen Energieträger	67
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
6	Thermische Energiespeicherung	75
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
7	Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke	117
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
8	Federn als Energiespeicher	127
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
9	Schwungradspeicher	135
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	Schwungradmassenspeicher 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	Gyrobuss	142
9.2.2.2	Einsatz in dieselektrischen Bussen	142
9.2.2.3	Einsatz in Dieselmotrfahrzeugen	143
10	Elektrochemische Energiespeicherung	145
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 ₂ -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
12	Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES)	207
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
	Literaturverzeichnis	223
	Stichwortverzeichnis	229