

Inhaltsverzeichnis

I Teil I Bedeutung und Einordnung von Speichern in der Energieversorgung

1	Energiespeicher im Wandel der Zeit	3
1.1	100 % erneuerbare Energie vor der industriellen Revolution	4
1.2	Fossile Energie im fossilen Zeitalter	14
1.3	Übergang und Rückführung zum Zeitalter der erneuerbaren Energien	18
1.4	Zusammenfassung	21
	Literatur	22
2	Definition und Klassifizierung von Energiespeichern	25
2.1	Definition und Anwendung	26
2.2	Nutzen von Speichern	33
2.3	Klassifizierung von Speichern	35
2.4	Zusammenfassung	44
	Literatur	46

II Teil II Bedarf an Energiespeicherung

3	Speicherbedarf in der Stromversorgung	49
3.1	Speicherbedarf und Überschüsse – Einflussfaktoren und Definitionen	50
3.2	Langfristszenarien des Bundesumweltministeriums	53
3.3	»100 % Strom aus erneuerbaren Quellen« laut Umweltbundesamt	66
3.4	VDE-ETG-Studie zum marktbasierten Speicherbedarf	83
3.5	Untersuchungen zum netzbasierten Speicherbedarf	96
3.6	Gegenüberstellung und Einordnung der Ergebnisse	100
3.7	Zusammenfassung	113
	Literatur	116
4	Speicherbedarf in der Wärmeversorgung	119
4.1	Grundlagen und Ziele	120
4.2	Entwicklung des Wärmebedarfs	120
4.3	Entwicklung des Wärmemix	121
4.4	Paradigmenwechsel im Wärmesektor	123
4.5	Speicherbedarf in einem Klimazielszenario für das Energiesystem Deutschland im Jahr 2050	125
4.6	Überschüsse, Speicherbedarf und Speicherpotenziale	128
4.7	Zusammenfassung	138
	Literatur	139
5	Speicherbedarf im Verkehrssektor	141
5.1	Grundlagen und Ziele	142
5.2	Entwicklung des Mobilitätsbedarfs	143
5.3	Entwicklung der Energie- und Kraftstoffversorgung	144
5.4	Paradigmenwechsel im Verkehrssektor	150

5.5	Speicherbedarf	153
5.6	Zusammenfassung	156
	Literatur	158

III Teil III Technologien der Energiespeicherung

6	Elektrische Energiespeicher	163
6.1	Kondensatoren – Supercaps	164
6.2	Supraleitfähige elektromagnetische Energiespeicher	184
6.3	Zusammenfassung	194
	Literatur	194
7	Elektrochemische Energiespeicher	197
7.1	Grundlagen	198
7.2	Blei-Säure-Batterien	212
7.3	Nickel-Batterien	231
7.4	Lithium-Batterien	248
7.5	Natrium-Schwefel-Batterien	271
7.6	Redox-Flow-Batterien	282
	Literatur	292
8	Chemische Energiespeicher	295
8.1	Grundlagen	296
8.2	Einspeichertechnologie Wasserelektrolyse	319
8.3	Einspeichertechnologien Methanisierung und chemische Synthesen	335
8.4	Speichermedien und Lagerung	365
8.5	Ausspeichertechnologien	390
8.6	Das Speichersystem Power-to-Gas	409
8.7	Das Speichersystem Power-to-Liquid	431
8.8	Ocean Fuels als Weiterentwicklung von Power-to-Gas und Power-to-Liquid	436
8.9	CO₂-minderndes Energiesystem mit Power-to-Gas, Power-to-Liquid und Ocean Fuels	445
8.10	Zusammenfassung	447
	Literatur	449
9	Mechanische Energiespeicher	455
9.1	Gasförmige Medien	456
9.2	Flüssige Medien	479
9.3	Feste Medien	505
9.4	Zusammenfassung	531
	Literatur	531
10	Thermische Energiespeicher	535
10.1	Unterscheidungsmerkmale thermischer Speicher	536
10.2	Speichertechnologien	537
10.3	Thermodynamische Grundlagen	538
10.4	Sensible thermische Energiespeicher	541
10.5	Latente thermische Energiespeicher	553

10.6	Thermochemische Energiespeicher	565
10.7	Kosten	571
	Literatur	572
11	Lastmanagement als Energiespeicher	575
11.1	Besonderheiten von <i>Demand Response</i> im Vergleich zu anderen Energiespeichern	578
11.2	<i>Demand Response</i> in Haushalten und Querschnittstechnologien	579
11.3	<i>Demand Response</i> in der Industrie	591
11.4	Zusammenfassung	594
	Literatur	594
12	Vergleich der Speichersysteme	597
12.1	Überblick über technische und ökonomische Parameter	599
12.2	Bestimmung der Anwendungsfelder durch Speicherkapazität und Auspeicherdauer	599
12.3	Kosten, Wirkungsgrad und Energiedichte im Vergleich	609
12.4	Entwicklungsstand, Stärken und Schwächen	612
12.5	Perspektiven für Energiespeicher und gesellschaftliche Akzeptanz	619
12.6	Zusammenfassung	622
	Literatur	623
IV	Teil IV Integration und Anwendung von Energiespeichern	
13	Speicherintegration in einzelnen Energiesektoren	629
13.1	Integration im Stromsektor	630
13.2	Integration im Wärmesektor	673
13.3	Integration im Verkehrssektor	689
13.4	Zusammenfassung	699
	Literatur	701
14	Speicherintegration zur Kopplung unterschiedlicher Energiesektoren	705
14.1	Kopplung von Strom- und Wärmesektor	706
14.2	Kopplung von Strom- und Verkehrssektor	720
14.3	Kopplung von Strom- und Gassektor: Power-to-Gas	728
14.4	Zusammenfassung	743
	Literatur	745
	Epilog	747