

# Inhaltsverzeichnis

---

## I Teil I Bedeutung und Einordnung von Speichern in der Energieversorgung

1	<b>Energiespeicher im Wandel der Zeit</b> .....	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	<b>Definition und Klassifizierung von Energiespeichern</b> .....	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	<b>Speicherbedarf in der Stromversorgung</b> .....	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 marktbasieren Speicherbedarf .....	83
3.5	Untersuchungen zum netzbasierten Speicherbedarf .....	96
3.6	Gegenüberstellung und Einordnung der Ergebnisse .....	100
3.7	Zusammenfassung .....	113
	Literatur .....	116
4	<b>Speicherbedarf in der Wärmeversorgung</b> .....	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	<b>Speicherbedarf im Verkehrssektor</b> .....	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	<b>Speicherbedarf</b> .....	153
5.6	<b>Zusammenfassung</b> .....	156
	<b>Literatur</b> .....	158

### III Teil III Technologien der Energiespeicherung

6	<b>Elektrische Energiespeicher</b> .....	163
6.1	<b>Kondensatoren – Supercaps</b> .....	164
6.2	<b>Supraleitfähige elektromagnetische Energiespeicher</b> .....	184
6.3	<b>Zusammenfassung</b> .....	194
	<b>Literatur</b> .....	194

7	<b>Elektrochemische Energiespeicher</b> .....	197
7.1	<b>Grundlagen</b> .....	198
7.2	<b>Blei-Säure-Batterien</b> .....	212
7.3	<b>Nickel-Batterien</b> .....	231
7.4	<b>Lithium-Batterien</b> .....	248
7.5	<b>Natrium-Schwefel-Batterien</b> .....	271
7.6	<b>Redox-Flow-Batterien</b> .....	282
	<b>Literatur</b> .....	292

8	<b>Chemische Energiespeicher</b> .....	295
8.1	<b>Grundlagen</b> .....	296
8.2	<b>Einspeichertechnologie Wasserelektrolyse</b> .....	319
8.3	<b>Einspeichertechnologien Methanisierung und chemische Synthesen</b> .....	335
8.4	<b>Speichermedien und Lagerung</b> .....	365
8.5	<b>Ausspeichertechnologien</b> .....	390
8.6	<b>Das Speichersystem Power-to-Gas</b> .....	409
8.7	<b>Das Speichersystem Power-to-Liquid</b> .....	431
8.8	<b>Ocean Fuels als Weiterentwicklung von Power-to-Gas und Power-to-Liquid</b> .....	436
8.9	<b>CO<sub>2</sub>-minderndes Energiesystem mit Power-to-Gas, Power-to-Liquid und Ocean Fuels</b> .....	445
8.10	<b>Zusammenfassung</b> .....	447
	<b>Literatur</b> .....	449

9	<b>Mechanische Energiespeicher</b> .....	455
9.1	<b>Gasförmige Medien</b> .....	456
9.2	<b>Flüssige Medien</b> .....	479
9.3	<b>Feste Medien</b> .....	505
9.4	<b>Zusammenfassung</b> .....	531
	<b>Literatur</b> .....	531

10	<b>Thermische Energiespeicher</b> .....	535
10.1	<b>Unterscheidungsmerkmale thermischer Speicher</b> .....	536
10.2	<b>Speichertechnologien</b> .....	537
10.3	<b>Thermodynamische Grundlagen</b> .....	538
10.4	<b>Sensible thermische Energiespeicher</b> .....	541
10.5	<b>Latente thermische Energiespeicher</b> .....	553

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