

Michael Sterner  
Ingo Stadler  
(Hrsg.)

# **Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration**

**2. korrigierte und ergänzte Auflage**

# Inhaltsverzeichnis

---

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

<b>1</b>	<b>Energiespeicher im Wandel der Zeit</b> .....	<b>3</b>
	<i>Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner (FENES OTH Regensburg)</i>	
<b>1.1</b>	<b>100% erneuerbare Energie vor der industriellen Revolution</b> .....	<b>5</b>
1.1.1	Photosynthese – Kernprozess der natürlichen Energiespeicherung .....	5
1.1.2	Holz, Torf, Energiepflanzen – Nutzung der gespeicherten Solarenergie .....	10
<b>1.2</b>	<b>Fossile Energie im fossilen Zeitalter</b> .....	<b>15</b>
1.2.1	Entstehung fossiler Energie .....	15
1.2.2	Nutzung und Emissionen fossiler Energie: Status quo .....	17
<b>1.3</b>	<b>Übergang und Rückführung zum Zeitalter der erneuerbaren Energien</b> .....	<b>17</b>
1.3.1	Klimawandel und Ressourcenknappheit – Treiber der globalen Energiewende .....	17
1.3.2	Das Zeitalter der erneuerbaren Energien als verbleibende Frage der Zeit – Szenarien zur Wende .....	20
<b>1.4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>23</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>Definition und Klassifizierung von Energiespeichern</b> .....	<b>25</b>
	<i>Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner (FENES OTH Regensburg)</i>	
	<i>Franz Bauer (FENES OTH Regensburg): Abschnitte 2.1, 2.2, 2.3, 2.4</i>	
<b>2.1</b>	<b>Definition und Anwendung</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2</b>	<b>Nutzen von Speichern</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3</b>	<b>Klassifizierung von Speichern</b> .....	<b>36</b>
2.3.1	Physikalisch-energetische Klassifizierung .....	36
2.3.2	Definition und Berechnung der wichtigsten Größen .....	38
2.3.3	Zeitliche Klassifizierung .....	44
2.3.4	Räumliche Klassifizierung .....	45
2.3.5	Ökonomische Klassifizierung .....	46
<b>2.4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>47</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>49</b>

## Teil II Bedarf an Energiespeicherung

<b>3</b>	<b>Speicherbedarf in der Stromversorgung</b> .....	<b>53</b>
	<i>Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner (FENES OTH Regensburg)</i>	
	<i>Dr. Christopher Breuer (Westnetz GmbH): Abschnitt 3.6</i>	
	<i>Tim Drees (IAEW RWTH Aachen): Abschnitte 3.5, 3.6</i>	
	<i>Fabian Eckert (FENES OTH Regensburg), Abschnitte 3.2., 3.3, 3.6, 3.7</i>	
	<i>Andreas Maaz (IAEW RWTH Aachen): Abschnitt 3.5</i>	
	<i>Carsten Pape (Fraunhofer IWES): Abschnitt 3.5</i>	
	<i>Dr. Niklas Rotering (IAEW RWTH Aachen): Abschnitt 3.4</i>	
	<i>Martin Thema (FENES OTH Regensburg): Abschnitte 3.7, 3.8</i>	

<b>3.1</b>	<b>Speicherbedarf und Überschüsse – Einflussfaktoren und Definitionen</b>	56
3.1.1	Grundsätzliche Einflüsse auf den Speicherbedarf	56
3.1.2	Definition Speicherbedarf	57
3.1.3	Unterscheidung marktbasierter und netzbasierter Stromüberschuss	58
<b>3.2</b>	<b>Langfristszenarien des Bundesumweltministeriums</b>	59
3.2.1	Entwicklung des Primär-, End- und Nutzenergiebedarfs	59
3.2.2	Entwicklung des Strommix	62
3.2.3	Auswirkung von Mindesterzeugung und Import/Export auf den Speicherbedarf	65
3.2.4	Auswirkung von Lastmanagement auf den Speicherbedarf	67
3.2.5	Speichereinsatz bei erneuerbaren Anteilen von 40 %, 63 % und 85 %	69
3.2.6	Zusammenfassung	71
<b>3.3</b>	<b>»100 % Strom aus erneuerbaren Quellen« laut Umweltbundesamt</b>	72
3.3.1	Annahmen zum Stromverbrauch in 2050	72
3.3.2	Technisch-ökologische Potenziale von erneuerbaren Energien, Speichern und Lastmanagement	74
3.3.3	Annahmen und Modellierung des Szenarios für 2050	78
3.3.4	Ergebnisse zu Speicherbedarf und Versorgungssicherheit	80
3.3.5	Zusammenfassung	88
<b>3.4</b>	<b>VDE-ETG-Studie zum marktbasierten Speicherbedarf</b>	89
3.4.1	Methodik	90
3.4.2	Annahmen der Modellbildung und Eingangsdaten	92
3.4.3	Szenarien-übergreifende Erkenntnisse	94
3.4.4	Erkenntnisse aus dem 40 %-Szenario	96
3.4.5	Erkenntnisse aus dem 80 %-Szenario	97
3.4.6	Erkenntnisse aus dem 100 %-Szenario	100
3.4.7	Zusammenfassung	100
<b>3.5</b>	<b>Studie »Roadmap Speicher« zum Speicherbedarf Deutschlands im europäischen Kontext</b>	101
3.5.1	Methodisches Vorgehen	102
3.5.2	Szenario	104
3.5.3	Mittelfristige Speichersimulation	108
3.5.4	Langfristige Speichersimulation	111
3.5.5	Wesentliche Erkenntnisse / Zusammenfassung	113
<b>3.6</b>	<b>Untersuchungen zum netzbasierten Speicherbedarf</b>	114
3.6.1	Methodisches Vorgehen zur Unterscheidung von markt- und netzbasiertem Speicherbedarf	114
3.6.2	Fallstudie Power-to-Gas in Deutschland im Jahr 2022 bei verzögertem Netzausbau	114
3.6.3	Minimaler Speicherbedarf im europäischen Netzverbund	117
3.6.4	Zusammenfassung	118
<b>3.7</b>	<b>Gegenüberstellung und Einordnung der Ergebnisse</b>	119
3.7.1	Gegenüberstellung der Ergebnisse der drei Studien	119
3.7.2	Einordnung der Ergebnisse im Vergleich zu weiteren Studien	119
<b>3.8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	135
	<b>Literatur</b>	138

<b>4</b>	<b>Speicherbedarf in der Wärmeversorgung</b> .....	141
	<i>Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner (FENES OTH Regensburg)</i>	
	<i>Fabian Eckert (FENES OTH Regensburg): Abschnitte 4.2, 4.4, 4.6, 4.7</i>	
	<i>Norman Gerhardt (Fraunhofer IWES): Abschnitte 4.4, 4.7, 4.8</i>	
	<i>Prof. Dr. Hans-Martin Henning (Fraunhofer ISE): Abschnitte 4.6, 4.7, 4.8</i>	
	<i>Andreas Palzer (Fraunhofer ISE): Abschnitt 4.6</i>	
<b>4.1</b>	<b>Grundlagen und Ziele</b> .....	143
<b>4.2</b>	<b>Entwicklung des Wärmebedarfs</b> .....	143
<b>4.3</b>	<b>Entwicklung des Wärmemix</b> .....	144
4.3.1	Fossile Wärmebereitstellung .....	144
4.3.2	Erneuerbare Wärmebereitstellung .....	144
<b>4.4</b>	<b>Transformation des Wärmesektors</b> .....	145
4.4.1	Haushalte .....	146
4.4.2	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen .....	147
4.4.3	Industrie .....	148
<b>4.5</b>	<b>Paradigmenwechsel im Wärmesektor</b> .....	149
4.5.1	Beispiel Wandel Erdöl – Erdgas – erneuerbare Energien .....	150
4.5.2	Strom als Primärenergie .....	150
<b>4.6</b>	<b>Speicherbedarf in einem Klimazielszenario für das Energiesystem</b>	
	<b>Deutschland im Jahr 2050</b> .....	151
4.6.1	Szenariorahmen, Modell und Annahmen .....	151
4.6.2	Ergebnisse zum Speichereinsatz im Wärmebereich .....	152
<b>4.7</b>	<b>Überschüsse, Speicherbedarf und Speicherpotenziale</b> .....	155
4.7.1	Überschüsse im Wärmesektor .....	155
4.7.2	Entwicklung des Speicherbedarfs .....	157
4.7.3	Speicherpotenziale .....	159
<b>4.8</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	165
	<b>Literatur</b> .....	167
<b>5</b>	<b>Speicherbedarf im Verkehrs- und Chemiesektor</b> .....	169
	<i>Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner (FENES OTH Regensburg)</i>	
	<i>Fabian Eckert (FENES OTH Regensburg): Abschnitte 5.3, 5.5, 5.6</i>	
	<i>Prof. Dr. Hans-Martin Henning (Fraunhofer ISE): Abschnitt 5.5</i>	
	<i>Tobias Trost (Fraunhofer IWES): Abschnitte 5.2, 5.4</i>	
<b>5.1</b>	<b>Grundlagen und Ziele im Verkehrssektor</b> .....	171
5.1.1	Ausgangslage und Entwicklung der letzten Jahrzehnte .....	171
5.1.2	Zielsetzungen im Verkehrssektor .....	171
<b>5.2</b>	<b>Entwicklung des Mobilitätsbedarfs</b> .....	172
5.2.1	Entwicklung der Bevölkerung .....	173
5.2.2	Entwicklung der Wirtschaftsleistung .....	173
5.2.3	Bandbreite der Entwicklung des Bedarfs in Personen- und Güterverkehr .....	173
<b>5.3</b>	<b>Entwicklung der Energie- und Kraftstoffversorgung</b> .....	173
5.3.1	Entwicklung im Personenverkehr .....	173
5.3.2	Entwicklung im Güterverkehr .....	175
5.3.3	Entwicklung des Energiemix im Verkehrssektor .....	176
<b>5.4</b>	<b>Paradigmenwechsel im Verkehrssektor</b> .....	178
5.4.1	Elektrifizierung der Mobilität über Batterien und Stromkraftstoffe .....	179
5.4.2	Integration erneuerbarer Energien als Grundpfeiler der Mobilität .....	182

<b>5.5</b>	<b>Speicherbedarf im Verkehrssektor</b> .....	182
5.5.1	Heutiger Speicherbedarf .....	182
5.5.2	Speicherbedarf in einem zu 50% erneuerbar versorgten Mobilitätssektor .....	183
5.5.3	Speicherbedarf in der Studie des Fraunhofer ISE .....	184
5.5.4	Speicherstudie für die Agora Energiewende .....	185
<b>5.6</b>	<b>Speicherbedarf in der chemischen Industrie</b> .....	186
5.6.1	Rohstoffverbrauch heute und im Jahr 2050 .....	187
5.6.2	Benötigte Power-to-X-Leistung für die chemische Industrie .....	188
<b>5.7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	188
	<b>Literatur</b> .....	191

## Teil III Technologien der Energiespeicherung

<b>6</b>	<b>Elektrische Energiespeicher</b> .....	195
	<i>Prof. Dr. Ingo Stadler (CIRE TH Köln)</i>	
<b>6.1</b>	<b>Kondensatoren – Supercaps</b> .....	197
6.1.1	Grundlagen eines Kondensators .....	197
6.1.2	Vom Kondensator zum Doppelschichtkondensator .....	200
6.1.3	Ladung und Entladung .....	203
6.1.4	Verluste, Wirkungsgrad und weitere Kennwerte .....	209
6.1.5	Lebensdauer .....	213
6.1.6	Anwendungsgebiete .....	216
<b>6.2</b>	<b>Supraleitfähige elektromagnetische Energiespeicher</b> .....	217
6.2.1	Grundlagen der Supraleitung .....	218
6.2.2	Supraleitfähiger elektromagnetischer Energiespeicher .....	219
<b>6.3</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	225
	<b>Literatur</b> .....	227
<b>7</b>	<b>Elektrochemische Energiespeicher</b> .....	229
	<i>Prof. Dr. Ingo Stadler (CIRE TH Köln)</i>	
	<i>Dr. Bernhard Riegel (Hoppecke Batterien): Abschnitt 7.6</i>	
	<i>Dr. Detlef Ohms (Hoppecke Batterien): Abschnitte 7.1, 7.3</i>	
	<i>Dr. Eduardo Cattaneo (Hoppecke Batterien): Abschnitt 7.6</i>	
	<i>Dr. Götz Langer (Hoppecke Batterien): Abschnitt 7.2</i>	
	<i>Dr. Matthias Herrmann (Hoppecke Batterien): Abschnitt 7.4</i>	
<b>7.1</b>	<b>Grundlagen</b> .....	232
7.1.1	Physikalische Grundzusammenhänge .....	232
7.1.2	Potenzialausbildung an Elektroden .....	233
7.1.3	Elektrodengleichgewicht .....	235
7.1.4	Nernst'sche Gleichung .....	235
7.1.5	Elektrochemische Umsätze an Elektroden .....	237
7.1.6	Elektrochemische Zellen und Zellreaktionen .....	237
7.1.7	Elektroden- und Zellpolarisation .....	239
7.1.8	Nebenreaktionen .....	241
7.1.9	Energie- und Wirkungsgradbetrachtungen .....	241
7.1.10	Typen elektrochemischer Energiespeicher und -wandler .....	242
7.1.11	Elektrolyte .....	243
7.1.12	Bauformen von Zellen .....	244
7.1.13	Kenngößen von Energiespeichern .....	244

<b>7.2</b>	<b>Blei-Säure-Batterien</b> .....	247
7.2.1	Aufbau .....	247
7.2.2	Grundreaktionen, Gleichgewicht, Zellenspannung .....	249
7.2.3	Stoffmengenbilanz, Speicherfähigkeit .....	250
7.2.4	Entladecharakteristik .....	250
7.2.5	Die Nebenreaktionen .....	254
7.2.6	Laden von Bleibatterien .....	257
7.2.7	Die verschlossene Bleibatterie .....	259
7.2.8	Alterungsmechanismen .....	262
<b>7.3</b>	<b>Nickel-Batterien</b> .....	264
7.3.1	Nickel-Cadmium-Batterien .....	266
7.3.2	Nickel-Metall-Hydrid Batterien .....	278
<b>7.4</b>	<b>Lithium-Batterien</b> .....	281
7.4.1	Funktionsprinzip, chemische Reaktionen und Aktivmaterialien .....	283
7.4.2	Zellspannung .....	283
7.4.3	Elektrolyt und elektrochemisches Stabilitätsfenster .....	287
7.4.4	Weitere Zellkomponenten .....	290
7.4.5	Leitfähigkeit der Elektrodenmaterialien .....	292
7.4.6	Bauformen und Anwendungsgebiete .....	294
7.4.7	Betriebsweise und typische Leistungsdaten .....	299
<b>7.5</b>	<b>Natrium-Schwefel-Batterien</b> .....	304
7.5.1	Die Elektroden .....	304
7.5.2	Der Elektrolyt/Separator .....	305
7.5.3	Das Heizsystem .....	306
7.5.4	Formen und Modulgrößen .....	307
7.5.5	Lade- und Entladevorgang .....	308
7.5.6	Zyklen, Kapazitäten und Lebensdauer .....	311
7.5.7	Wirkungsgrad, Leistung und Energien .....	312
7.5.8	Gefahren und Sicherheit .....	313
<b>7.6</b>	<b>Redox-Flow-Batterien</b> .....	315
7.6.1	Aufbau und Funktionsweise der Redox-Flow-Zelle .....	315
7.6.2	Mögliche Materialpaarungen .....	319
7.6.3	Lade- und Entladestrategien .....	320
7.6.4	Energie-, Leistungsdichte und Wirkungsgrad .....	322
7.6.5	Die Redox-Flow-Batterie im Vergleich .....	323
7.6.6	Lebensdauer und lebensdauerverkürzende Mechanismen .....	323
7.6.7	Anwendungsbereiche von Redox-Flow-Batterien .....	323
7.6.8	Recycling, Umwelt und Sicherheit .....	324
	<b>Literatur</b> .....	325
<b>8</b>	<b>Chemische Energiespeicher</b> .....	327
	<i>Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner (FENES OTH Regensburg)</i>	
	<i>Franz Bauer (FENES OTH Regensburg): Abschnitt 8.1</i>	
	<i>Fritz Crotogino (KBB Underground Technology): Abschnitt 8.4</i>	
	<i>Fabian Eckert (FENES OTH Regensburg): Abschnitte 8.1, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 8.7</i>	
	<i>Christian von Olshausen (sunfire GmbH): Abschnitte 8.1, 8.2, 8.6, 8.7</i>	
	<i>Dr.-Ing. Daniel Teichmann (Hydrogenious Technologies GmbH): Abschnitt 8.4</i>	
	<i>Martin Thema (FENES OTH Regensburg): Abschnitte 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6</i>	

<b>8.1</b>	<b>Grundlagen</b> .....	330
8.1.1	Das C-H-O-System als Basis der chemischen Energiespeicherung .....	330
8.1.2	Wasserstoff als Energieträger .....	332
8.1.3	Wasserstoffherstellung .....	334
8.1.4	Thermodynamik der Wasserspaltung .....	342
8.1.5	Elektrolytische Leitfähigkeit .....	347
<b>8.2</b>	<b>Einspeichertechnologie Wasserelektrolyse</b> .....	354
8.2.1	Überblick .....	354
8.2.2	Elektrolysezelle – Elektrolysearten .....	356
8.2.3	Elektrolyseblock – Stackdesign .....	361
8.2.4	Elektrolyseur, Elektrolyse-Anlage und ihre Peripherie .....	361
8.2.5	Vergleich der einzelnen Elektrolysetechnologien .....	364
8.2.6	Wirkungsgradsteigerung durch Abwärmenutzung .....	364
<b>8.3</b>	<b>Einspeichertechnologien Methanisierung und chemische Synthesen</b> .....	370
8.3.1	Überblick und Methan als Energieträger .....	370
8.3.2	CO <sub>2</sub> -Quellen für Power-to-X .....	372
8.3.3	Chemische Methanisierung .....	374
8.3.4	Biologische Methanisierung .....	382
8.3.5	Methanolsynthese .....	390
8.3.6	Fischer-Tropsch-Synthese .....	395
<b>8.4</b>	<b>Speichermedien und Lagerung</b> .....	402
8.4.1	Gasförmige Speichermedien .....	402
8.4.2	Flüssige Speichermedien .....	416
8.4.3	Feste Speichermedien .....	427
<b>8.5</b>	<b>Ausspeichertechnologien</b> .....	431
8.5.1	Stromerzeugung durch Kraft-Wärme-Kopplung .....	431
8.5.2	Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden .....	440
8.5.3	Mobilität und Verkehr .....	446
<b>8.6</b>	<b>Das Speichersystem Power-to-Gas</b> .....	449
8.6.1	Anfänge von Power-to-Gas .....	449
8.6.2	Power-to-Gas-Wasserstoff .....	452
8.6.3	Power-to-Gas-Methan .....	455
8.6.4	Wirkungsgrade, Potenziale, CO <sub>2</sub> -Emissionen und Kosten .....	462
8.6.5	Vor- und Nachteile von Wasserstoff vs. Methan .....	468
<b>8.7</b>	<b>Das Speichersystem Power-to-Liquid</b> .....	470
8.7.1	Power-to-Liquid zur Gewinnung von Fischer-Tropsch- Flüssigkraftstoffen .....	473
8.7.2	Power-to-Liquid zur Gewinnung von Methanol .....	473
8.7.3	Wirkungsgrade, Kosten und erste Märkte .....	475
<b>8.8</b>	<b>Ocean Fuels als Weiterentwicklung von Power-to-Gas und Power-to-Liquid</b> .....	476
8.8.1	Rohstoffe und Kraftstoffe vom Meer – eine Frage des Potenzials und der Akzeptanz ...	476
8.8.2	Option schwimmende Windplattformen .....	480
8.8.3	Option Segelenergie .....	482
<b>8.9</b>	<b>CO<sub>2</sub>-minderndes Energiesystem mit Power-to-Gas, Power-to-Liquid und Ocean Fuels</b> .....	485
8.10	Zusammenfassung .....	487
	<b>Literatur</b> .....	489

<b>9</b>	<b>Mechanische Energiespeicher</b> .....	495
	<i>Prof. Dr. Ingo Stadler (CIRE TH Köln)</i>	
	<i>Franz Bauer (FENES OTH Regensburg): Abschnitt 9.3</i>	
	<i>Marcus Budt (Fraunhofer UMSICHT): Abschnitt 9.1</i>	
	<i>Prof. Eduard Heindl (Heindl Energy): Abschnitt 9.3</i>	
	<i>Dr. Daniel Wolf (Home Power Solution GmbH): Abschnitt 9.1</i>	
<b>9.1</b>	<b>Gasförmige Medien</b> .....	497
9.1.1	Druckluftspeicherkraftwerke .....	497
9.1.2	Erneuerbare, emissionsfreie Druckluftspeicherprozesse .....	506
9.1.3	Druckluftspeichervolumen .....	515
<b>9.2</b>	<b>Flüssige Medien</b> .....	520
9.2.1	Pumpspeicherwerke .....	520
9.2.2	Innovative Konzepte zur Speicherung potenzieller Energie in flüssigen Medien .....	525
<b>9.3</b>	<b>Feste Medien</b> .....	548
9.3.1	Schwungradspeicher .....	548
9.3.2	Lageenergiespeicher .....	562
<b>9.4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	573
	<b>Literatur</b> .....	573
<b>10</b>	<b>Thermische Energiespeicher</b> .....	579
	<i>Prof. Dr. Ingo Stadler (CIRE TH Köln)</i>	
	<i>Dr. Andreas Hauer (ZAE Bayern): Abschnitte 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7</i>	
<b>10.1</b>	<b>Unterscheidungsmerkmale thermischer Speicher</b> .....	581
<b>10.2</b>	<b>Speichertechnologien</b> .....	582
10.2.1	Sensible Wärmespeicherung .....	582
10.2.2	Latente Wärmespeicherung .....	582
10.2.3	Thermochemische Wärmespeicherung .....	583
<b>10.3</b>	<b>Thermodynamische Grundlagen</b> .....	583
10.3.1	Thermische Energie .....	583
10.3.2	Wärmeübertragung .....	584
10.3.3	Wärmedämmung .....	585
<b>10.4</b>	<b>Sensible thermische Energiespeicher</b> .....	586
10.4.1	Speichermaterialien .....	587
10.4.2	Speicher mit festem Speichermedium .....	589
10.4.3	Speicher mit flüssigem Speichermedium .....	592
10.4.4	Zusammenfassung .....	597
<b>10.5</b>	<b>Latente thermische Energiespeicher</b> .....	598
10.5.1	Charakterisierung von Materialien zur Latentwärmespeicherung .....	601
10.5.2	Materialien zur Latentwärmespeicherung .....	602
10.5.3	Wärmeübertragungskonzepte .....	607
10.5.4	Zusammenfassung .....	610
<b>10.6</b>	<b>Thermochemische Energiespeicher</b> .....	610
10.6.1	Speichermaterialien thermochemischer Prozesse .....	611
10.6.2	Bauformen .....	613
10.6.3	Zusammenfassung .....	615
<b>10.7</b>	<b>Kosten</b> .....	616
	<b>Literatur</b> .....	617



<b>11</b>	<b>Lastmanagement als Energiespeicher</b> .....	619
	<i>Prof. Dr. Ingo Stadler (CIRE TH Köln)</i>	
	<i>Fabian Eckert (FENES OTH Regensburg): Abschnitte 11.4, 11.5, 11.6</i>	
<b>11.1</b>	<b>Besonderheiten von Demand Response im Vergleich zu anderen Energiespeichern</b> .....	623
<b>11.2</b>	<b>Demand Response in Haushalten und Querschnittstechnologien</b> .....	624
11.2.1	Speicherheizungen .....	624
11.2.2	Elektrische Warmwasserbereitung .....	626
11.2.3	Elektrische Kälteerzeugung .....	628
11.2.4	Heizungsumwälzpumpen .....	632
11.2.5	Lüftungsanlagen .....	633
11.2.6	Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschinen .....	634
<b>11.3</b>	<b>Demand Response in der Industrie</b> .....	635
<b>11.4</b>	<b>Zusammenfassung deutscher und europäischer Demand Response-Potenziale</b> ...	639
11.4.1	Demand Response-Potenziale in Deutschland .....	639
11.4.2	Demand Response-Potenziale in Europa .....	640
11.4.3	Vergleich einzelner DSM-Studien .....	640
<b>11.5</b>	<b>Entwicklungen und Trends</b> .....	640
11.5.1	Einsatz von Lastabwurf in der Industrie .....	640
11.5.2	Entwicklung des technisch-ökonomischen Potenzials .....	641
11.5.3	Gesicherte Leistung und Integration von erneuerbarer Energie .....	642
11.5.4	Potenzial zur Reduzierung von Netzausbau und Jahreshöchstlast .....	642
<b>11.6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	643
	<b>Literatur</b> .....	643
<b>12</b>	<b>Vergleich der Speichersysteme</b> .....	645
	<i>Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner (FENES OTH Regensburg)</i>	
	<i>Martin Thoma (FENES OTH Regensburg): Abschnitte 12.1, 12.2, 12.3, 12.4</i>	
<b>12.1</b>	<b>Überblick über technische und ökonomische Parameter</b> .....	648
<b>12.2</b>	<b>Bestimmung der Anwendungsfelder durch Speicherkapazität und Auspeicherdauer</b> .....	648
12.2.1	Elektrische Energiespeicher – Kondensatoren und Spulen .....	654
12.2.2	Elektrochemische Energiespeicher – Batterien .....	655
12.2.3	Mechanische Energiespeicher – Pumpspeicher, Druckluft und Schwungmassen .....	656
12.2.4	Thermische Energiespeicher – Wärmespeicher .....	656
12.2.5	Chemische Energiespeicher – Power-to-X .....	656
12.2.6	Lastmanagement .....	657
<b>12.3</b>	<b>Kosten, Wirkungsgrad und Energiedichte im Vergleich</b> .....	658
12.3.1	Vergleich aller Speicher nach Kosten, Wirkungsgrad und Energiedichte .....	658
12.3.2	Kostenvergleich von Stromspeichern nach Zyklendauer .....	661
<b>12.4</b>	<b>Entwicklungsstand, Stärken und Schwächen</b> .....	662
12.4.1	Technologischer Entwicklungsstand der Energiespeicher .....	662
12.4.2	Stärken und Schwächen verschiedener Technologien .....	663
<b>12.5</b>	<b>Kostensenkungspotenziale für Batterien und Power-to-X</b> .....	663
12.5.1	Kostentrends und Kostenpotenziale von Lithium-Batterien .....	664
12.5.2	Kostensenkungspotenziale von Power-to-Gas .....	673
<b>12.6</b>	<b>Perspektiven für Energiespeicher und gesellschaftliche Akzeptanz</b> .....	674
<b>12.7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	678
	<b>Literatur</b> .....	680

## Teil IV Integration und Anwendung von Energiespeichern

<b>13</b>	<b>Speicherintegration in einzelnen Energiesektoren</b> .....	685
	<i>Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner (FENES OTH Regensburg)</i>	
	<i>Prof. Dr. Ingo Stadler (CIRE TH Köln)</i>	
	<i>Fabian Eckert (FENES OTH Regensburg): Abschnitte 13.1, 13.2, 13.3</i>	
	<i>Martin Thema (FENES OTH Regensburg): Abschnitt 13.1</i>	
<b>13.1</b>	<b>Integration im Stromsektor</b> .....	687
13.1.1	Funktion und Nutzen von Speichern im Stromsektor .....	687
13.1.2	Pumpspeicherwerke und Speicherkraftwerke .....	694
13.1.3	Schwungradspeicher .....	706
13.1.4	Batteriekraftwerke .....	707
13.1.5	Dezentrale Batteriespeicher in Häusern und Quartieren .....	710
13.1.6	Inselnetze mit erneuerbaren Energien und Speichern .....	718
13.1.7	Wärmespeicher in solarthermischen Kraftwerken .....	733
<b>13.2</b>	<b>Integration im Wärmesektor</b> .....	736
13.2.1	Wärmespeicher für Solarthermie .....	736
13.2.2	Latent- und Sorptionsspeicher in Gebäuden und Haushalt .....	744
13.2.3	Holz als chemischer Speicher in Forst und Wald für die Wärmeversorgung .....	747
<b>13.3</b>	<b>Integration im Verkehrssektor</b> .....	752
13.3.1	Beimischung von Biokraftstoffen und Nutzung von Pflanzenöl .....	752
13.3.2	Integration von Wasserstoff im Verkehr .....	756
13.3.3	Integration von Schwungradspeichern im öffentlichen Nahverkehr .....	759
<b>13.4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	762
	<b>Literatur</b> .....	764
<b>14</b>	<b>Speicherintegration zur Kopplung unterschiedlicher Energiesektoren</b> ...	769
	<i>Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner (FENES OTH Regensburg)</i>	
	<i>Prof. Dr. Ingo Stadler (CIRE TH Köln)</i>	
	<i>Fabian Eckert (FENES OTH Regensburg): Abschnitte 14.1, 14.2, 14.3</i>	
	<i>Norman Gerhardt (Fraunhofer IWES): Abschnitt 14.1</i>	
	<i>Christian von Olshausen (sunfire GmbH): Abschnitt 14.2</i>	
	<i>Martin Thema (FENES OTH Regensburg): Abschnitte 14.2, 14.3</i>	
	<i>Tobias Trost (Fraunhofer IWES): Abschnitt 14.2</i>	
<b>14.1</b>	<b>Kopplung von Strom- und Wärmesektor</b> .....	771
14.1.1	Flexibilisierung der Kraft-Wärme-Kopplung über Wärmespeicher und Wärmenetze ....	771
14.1.2	Integration von Elektrowärmepumpen über Wärmespeicher und Wärmenetze .....	777
14.1.3	Integration von Power-to-Heat über Wärmespeicher und Wärmenetze .....	780
14.1.4	Batteriespeicher vs. Lastverschiebung vs. Wärmespeicher – ein Beispiel .....	786
<b>14.2</b>	<b>Kopplung von Strom- und Verkehrssektor</b> .....	788
14.2.1	Elektromobilität .....	788
14.2.2	Stromkraftstoffe .....	792
<b>14.3</b>	<b>Kopplung von Strom- und Gassektor: Power-to-Gas</b> .....	798
14.3.1	Power-to-Gas im Kontext der Energieversorgung .....	798
14.3.2	Entwicklung von Power-to-Gas in Deutschland und in den Nachbarländern .....	801
<b>14.4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	814
	<b>Literatur</b> .....	817

<b>15</b>	<b>Rechtliche Rahmenbedingungen für Speicher in Deutschland</b> .....	819
	<i>Dr. Henning Thomas, LL.M. (Dong Energy)</i>	
<b>15.1</b>	<b>Rechtsvorschriften für die Energiespeicherung</b> .....	821
15.1.1	Vorrang von EnWG, EEG und KWKG .....	821
<b>15.2</b>	<b>Aktuelle Einordnung in das Energiewirtschaftsrecht</b> .....	821
15.2.1	Speicher im EnWG .....	821
15.2.2	Speicher im EEG .....	822
15.2.3	Zuordnung des Speichers zu Erzeugung und Vertrieb oder zum Netz .....	823
<b>15.3</b>	<b>Netzanschluss von Stromspeichern</b> .....	824
15.3.1	Anschluss nach dem EnWG .....	824
15.3.2	Anschluss nach dem EEG .....	824
<b>15.4</b>	<b>Stromkostenbelastungen bei der Einspeicherung</b> .....	825
15.4.1	Speicherung als Letztverbrauch von Strom .....	825
15.4.2	Netznutzungsentgelte .....	826
15.4.3	EEG-Umlage .....	827
15.4.4	Stromsteuer .....	830
15.4.5	Übersicht für Pumpspeicher, Batterien und Power-to-Gas .....	831
<b>15.5</b>	<b>Teilnahme von Energiespeichern an den Energiemärkten</b> .....	831
15.5.1	Vermarktungsmöglichkeiten im Energiewirtschaftsrecht .....	833
15.5.2	Vermarktungsmöglichkeiten im EEG .....	836
15.5.3	Förderprogramme .....	839
<b>15.6</b>	<b>Sonderfall Power-to-Gas</b> .....	839
15.6.1	Privilegierte Einspeisung in das Erdgasnetz .....	840
15.6.2	Einsatz als Biokraftstoff .....	841
<b>15.7</b>	<b>Genehmigung von Energiespeichern</b> .....	841
15.7.1	Planerische Voraussetzungen .....	841
15.7.2	Genehmigungserfordernisse .....	841
<b>15.8</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	842
	<b>Literatur</b> .....	844
	<b>Serviceteil</b>	
	<b>Epilog</b> .....	846
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	847