

Forschungs- und Entwicklungspotenziale der Thüringer Energiespeicherbranche

Energiespeicherstudie für das Bundesland Thüringen



Eine Studie von:



Veröffentlichung: August 2019

Informationen zur Studie

Autoren

Christian Stolze, Lutz Gollmer, Dr. Martin D. Hager, Prof.
Dr. Michael Stelter, Prof. Dr. Ulrich S. Schubert
Center for Energy and Environmental Chemistry Jena
(CEEC Jena), Philosophenweg 7a, 07743 Jena
Website: www.ceec.uni-jena.de

Jana Liebe, Maria Ehrich, Bianca Jelinek
Thüringer Erneuerbare Energien Netzwerk (ThEEN) e.V.,
Mainzerhofstraße 10, 99084 Erfurt
Website: www.theen-ev.de

Martin Ammon, Linda Fahmy
EuPD Research Sustainable Management GmbH, Adenauerallee 134, 53113 Bonn
Website: www.eupd-research.com

Durchführung & Finanzierung

Koordination, Layout, Erfassung der Rahmenbedingungen, Technische Beschreibung der Speichertechnologien samt Erfassung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Thüringen, sowie die Identifizierung und Klassifizierung von Geschäftsmodellen für Energiespeicheranwendungen: CEEC Jena, Philosophenweg 7a, 07743 Jena.

Organisation, Durchführung und Auswertung der Experteninterviews, sowie der zwei Expertenworkshops:

ThEEN e.V., Mainzerhofstraße 10, 99084 Erfurt.

Beschreibung, Einordnung in die TRL-Stufen, Evaluierung der Umweltverträglichkeiten und Kosten der ein-

zelnen Speichertechnologien, Definition der Wertschöpfungsketten, Umfassende Ist-Analyse der Unternehmens-, Forschungs- und Netzwerkstrukturen der Energiespeicherbranche in Thüringen: EuPD Research Sustainable Management GmbH, Adenauerallee 134, 53113 Bonn.

Projektlaufzeit & Finanzierung

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen des Projektes „Forschungs- und Entwicklungspotentiale der Thüringer Energiespeicherstudie (2016 FGI 0035)“ vom 01.11.2016 bis 31.10.2017 von der Thüringer Aufbaubank finanziert. Die Studie adressiert den Maßnahmenvorschlag EnRes 15/2017 Studie „Thüringer Branche der Energiespeicherung – Forschung- und Entwicklungspotenziale“, der im Rahmen des Arbeitskreises Nachhaltige Energie und Ressourcenverwendung der Thüringer Innovationsstrategie (RIS3 Thüringen) erarbeitet wurde.

Danksagung

Die Autoren möchten an dieser Stelle allen Unterstützern danken, welche die Erstellung der Studie durch die Bereitstellung wichtiger Daten und durch ihre Beteiligung an Diskussionen und Erhebungen ermöglicht haben. Besonderer Dank gilt vor allem den Branchenexperten, die sich die Zeit genommen haben, um an den Interviews und Expertenworkshops teilzunehmen, um ihre Erfahrungen sowie Sachkenntnisse in diese einzubringen.

1. Auflage

ISBN 978-3-00-060665-6

Veröffentlichung: August 2019

Diese Studie ist online unter <https://www.ceec.uni-jena.de/Downloads.html> abrufbar

Inhaltsverzeichnis

Informationen zur Studie	2
Autoren	2
Durchführung & Finanzierung	2
Projektlaufzeit & Finanzierung	2
Danksagung	2
Inhaltsverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
2 Rahmenbedingungen für die Energiewende in Thüringen	2
2.1 Politische Rahmenbedingungen	2
2.2 Technische und strukturelle Rahmenbedingungen	4
2.2.1 Energieverbrauch und Energiemix in Thüringen	4
2.2.2 Energiesektoren und Energienetze	5
2.2.3 Stromsektor in Thüringen	7
2.2.4 Wärmesektor in Thüringen	10
2.2.5 Gassektor in Thüringen	10
2.2.6 Verkehrssektor in Thüringen	11
2.3 Implikationen für einen Strukturwandel im Thüringer Energienetz.....	12
2.3.1 Anforderungen an das Stromnetz	12
2.3.2 Anforderungen an das Wärmenetz.....	13
2.3.3 Anforderungen an das Gasnetz.....	14
2.3.4 Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur	14
2.3.5 Einsatzmöglichkeiten von Energiespeichern im zukünftigen Energienetz	15
2.3.6 Speicherkapazitäten in Thüringen	17
2.4 Das Förderprogramm „Solar Invest“	19
3 Energiespeichertechnologien	21
3.1 Physikalische Begriffe	21
3.2 Technische Begriffe	21
3.3 Anforderungen und Klassifizierungen	23
3.3.1 Anforderungen für stationäre Anwendungen	23
3.3.2 Anforderungen für mobile Anwendungen	24
3.3.3 Klassifizierungen von Energiespeichern	25
3.4 Speichertechnologien im Überblick	25
3.4.1 Mechanische Energiespeicher	26
3.4.2 Chemische Energiespeicher	28
3.4.3 Elektrische Energiespeicher	33
3.4.4 Thermische Energiespeicher	34
3.4.5 Sektorkoppelnde Technologien	36
3.5 Sektorkopplung und Ausnutzung von Synergieeffekten der unterschiedlichen Speichertechnologien	37

3.6 Technische Evaluation von Speichertechnologien	38
3.6.1 Speicher im Stromsektor.....	38
3.6.2 Speicher im Wärmesektor.....	40
3.7 Ökonomische Evaluation	41
3.7.1 Kostenfaktoren.....	41
3.7.2 Technologischer Reifegrad.....	42
3.7.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse	45
3.8 Wertschöpfungsketten.....	48
3.8.1 Wertschöpfungsketten im Stromsektor.....	48
3.8.2 Wertschöpfungsketten im Wärmesektor	50
4 Struktur der Thüringer Energiespeicherbranche (Ist-Analyse).....	52
4.1 Unternehmensstrukturen	52
4.1.1 Speicher im Stromsektor.....	52
4.1.2 Speicher im Wärmesektor.....	53
4.2 Forschungsstrukturen.....	57
4.2.1 Center for Energy and Environmental Chemistry (CEEC) / Friedrich-Schiller-Universität Jena	57
4.2.2 Technische Universität Ilmenau – Fachgebiet Elektrochemie und Galvanotechnik	58
4.2.3 Technische Universität Ilmenau – Institut für Thermo- und Fluidodynamik	58
4.2.4 Hochschule Nordhausen – Institut für Regenerative Energietechnik (in.RET).....	58
4.2.5 Bauhaus-Universität Weimar – Fakultät für Bauingenieurwesen.....	58
4.2.6 Fraunhofer IOSB-AST.....	58
4.2.7 Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)	59
4.2.8 Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-forschung e.V. (TITK)	59
4.2.9 Institut für angewandte Bauforschung (IAB) Weimar gGmbH.....	60
4.3 Netzwerkstrukturen	60
4.3.1 Arbeitskreis Nachhaltige Energie und Ressourcenverwendung	60
4.3.2 Thüringer Erneuerbare Energien Netzwerk (ThEEN) e.V.	60
4.3.3 Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur (ThEGA)	61
4.3.4 Energie- und Umweltpark Thüringen e.V.....	61
4.3.5 Netzwerk PolymerTherm	61
4.3.6 Innovationscluster Nachhaltigkeit – INA.....	61
4.3.7 H2-Well – Vision regionale Wasserstoffwirtschaft	61
5 Geschäftsmodelle für Stromspeicher	62
5.1 Pumpspeicherkraftwerke (PSW)	62
5.1.1 Markt.....	63
5.1.2 Potentiale.....	64
5.2 Stationäre Batteriespeicher	66
5.2.1 Heimspeicher	67
5.2.2 Quartierspeicher	70

5.2.3 Industriespeicher	71
5.2.4 Premium-Power	74
5.2.5 Speicherauswahl	75
5.3 Power-to-X	77
5.3.1 Markt.....	77
5.3.2 Potentiale.....	78
5.3.3 Herausforderungen	80
6 Brancheneinschätzung aus Expertensicht	81
6.1 Standort Thüringen	81
6.1.1 Vor- und Nachteile des Standortes Thüringen	81
6.1.2 Rolle des Freistaates	82
6.2 Wettbewerbssituation	83
6.3 Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten	84
6.4 Geschäftsmodelle	86
6.5 Entwicklungstendenzen.....	87
7 Zusammenfassung	89
7.1 Rahmenbedingungen für die Energiewende in Thüringen.....	89
7.2 Forschungsaktivitäten, Wertschöpfungsketten und Branchenstrukturen	90
7.2.1 Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.....	90
7.2.2 Wertschöpfungsketten und Branchenstrukturen	92
7.3 Geschäftsmodelle	93
7.4 Brancheneinschätzung aus Expertensicht	93
Anhang	95

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund eines sich wandelnden Klimas, das heute mit hoher Wahrscheinlichkeit dem vom Menschen verursachten Anstieg des Kohlenstoffdioxidgehalts in der Erdatmosphäre zugeschrieben wird, stehen alle Nationen in der Verantwortung den Ausstoß dieses Treibhausgases massiv zu reduzieren. Mit dem Klimaabkommen von Paris haben sich nahezu alle Staaten der Erde dem Ziel verschrieben, die globale Erwärmung durch verminderten CO₂-Ausstoß auf deutlich unter 2 °C im Vergleich zu vorindustriellen Werten zu begrenzen.¹

Deutschland strebt mit dem auf Grund von Sicherheitsaspekten geplanten Abbau seiner Atomkraftwerke und mit dem Klimaschutzplan 2050 eine umfassende Energiewende an. Durch die starke Reduktion der Verwendung fossiler Energieträger soll der Ausstoß von CO₂ bis 2050 um 80 bis 95% im Vergleich zu 1990 gemindert werden.² Dies soll vor allem durch die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energieträger (z. B. Wind, Sonne, Biomasse, Wasserstoff, synthetisches Erdgas) am Energiemix und dem Umbau der Energieversorgungsstruktur hin zu einer dezentralen Energieversorgung erreicht werden. Um dennoch eine flächendeckende stabile Energieversorgung gewährleisten zu können, wird im Vergleich zur konventionellen zentralen Energieversorgung ein weitaus höheres Maß an Flexibilitätsoptionen benötigt. Energiespeichertechnologien werden in diesem Kontext einen sehr hohen Stellenwert einnehmen, um die geplanten klimapolitischen Ziele sowohl im Bund als auch weltweit erfolgreich zu verwirklichen. Die Bundesländer stehen in der Verantwortung zur Umsetzung der Klimaziele Strategien zu entwickeln, welche die jeweils vorherrschenden geographischen, sozialen und wirtschaftlichen Bedingungen berücksichtigen. Im Thü-

ringer Landtag wird zu diesem Zweck aktuell der Entwurf eines „Thüringer Klimagesetzes“ beraten.

In der öffentlich zugänglichen Literatur fehlt es mit Hinblick auf die zuvor erwähnte wichtige Rolle von Energiespeichern in der Energiewende allerdings an detaillierten Betrachtungen der Thüringer Energiespeicherbranche. Die vorliegende Studie soll diese Lücke ein Stück weit füllen, indem die „Forschungs- und Entwicklungspotenziale der Thüringer Energiespeicherbranche“ untersucht werden. Es soll hiermit eine erste Datengrundlage für die öffentliche Diskussion mit dem Ziel der Weiterentwicklung der Branche geschaffen werden. Zu diesem Zweck adressiert diese Studie drei Arbeitspakete:

- **Arbeitspaket 1** beinhaltet die Umfeldanalyse und eine umfassende Ist-Analyse der Thüringer Unternehmen und Forschungseinrichtungen im Bereich der Energiespeicherung, sowie die Identifizierung vorhandener Verbünde, Netzwerke und Kooperationsbeziehungen.
- **Arbeitspaket 2** umfasst die Recherche und Einordnung der in Thüringen vorhandenen Speichertechnologien und die hierzu stattfindenden Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.
- **Arbeitspaket 3** adressiert die Identifizierung, Klassifikation und erste Parametrierung von Geschäftsmodellen für Herstellung, Betrieb und Anwendung der Speicher in den Domänen der Netzintegration, kommerzieller sowie privater Anwender.

¹ UNFCCC (2015), FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1, Adoption of the Paris Agreement, <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> (Zugriff: 29.08.2018).

² Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016), „Klimaschutzplan 2050“.

2 Rahmenbedingungen für die Energiewende in Thüringen

Der politisch und gesellschaftlich geforderte Umbau der Energieversorgungsstruktur in Deutschland wird in den kommenden Jahren erhebliche Anpassungen der Netzinfrastruktur erfordern. Hintergrund ist der stetig ansteigende Anteil erneuerbarer Energien am deutschen Energiemix, deren Erzeugungsleistung regional und saisonal erheblich schwankt. Die Implikationen der Energiewende für einen strukturellen Wandel des Energienetzes sind ebenso komplex, wie zahlreich. Dabei ergeben sich für die einzelnen Bundesländer unterschiedliche Herausforderungen auf Grund ihrer unterschiedlichen geografischen, sozialen, politischen und ökonomischen Voraussetzungen.

In diesem Kapitel sollen zunächst die aktuellen politischen und technischen Rahmenbedingungen für die Energiewende im Bundesland Thüringen erläutert werden. Dies schließt zunächst eine komprimierte Darstellung der vorhandenen Ansätze für eine „Integrierte Thüringer Energie- und Klimaschutzstrategie“ sowie den Aufbau und die Organisation des Thüringer Energienetzes ein. Anschließend werden Implikationen für den notwendigen strukturellen Wandel im Energienetz mit Hinblick auf die möglichen Einsatzmöglichkeiten von Energiespeichern in einem auf erneuerbaren Energien basierenden Energienetz diskutiert.

2.1 Politische Rahmenbedingungen

Laut Koalitionsvertrag der seit Dezember 2014 amtierenden rot-rot-grünen Landesregierung soll Thüringen „bis 2040 seinen Eigenenergiebedarf bilanziell durch einen Mix aus 100 Prozent regenerativer Energie selbst decken können“. Weiterhin soll bis zum Jahr 2020 der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch

35% erreicht haben. Zur Umsetzung dieser Ziele sollte bis Ende 2015 eine „Thüringer Energie- und Klimaschutzstrategie“ verabschiedet werden.^{3,4} Jedoch wurde hierzu erst im Februar 2018 ein im Bürgerdialog erarbeitetes Strategiepapier veröffentlicht.⁵ Ein hieraus abgeleiteter Gesetzesentwurf wird derzeit (Stand August 2018) im Landtag beraten.⁶

Das vom Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN) in Auftrag gegebene „Gutachten zur Vorbereitung einer Energie- und Klimaschutzstrategie für Thüringen“ des Leipziger Instituts für Energie GmbH vom November 2016 beinhaltet bereits eine wissenschaftliche Analyse sinnvoller Energie- und Klimazielszenarien für Thüringen.⁷ Diese wurden unter Berücksichtigung der politischen Zielsetzungen erstellt, die sowohl von der Bundesregierung für den Bund als auch von der Landesregierung für den Freistaat beschlossen wurden. Das vom Leipziger Institut für Energie empfohlene (proaktive) Zielszenario setzt eine starke Intensivierung „der Anstrengungen in allen Bereichen“ voraus. Laut Gutachten ergäbe sich u. a. durch

- einen starken Ausbau der erneuerbaren Energien und eine anteilige Ausschöpfung der in Thüringen bestehenden ungenutzten Potenziale zur Wärme (11,3 TWh) und Strombereitstellung (31,9 bis 56,9 TWh) aus erneuerbaren Energien,
- einer Steigerung der Energieproduktivität bzw. Energieeffizienz von mindestens 2,1% je Jahr (gemäß Energiekonzept der Bundesregierung),
- eine zunehmende Anwendung der Sektorkoppelungspotenziale (insbesondere für Strom aus erneuerbaren Energien in neuen Anwendungsgebieten),

³ Koalitionsvertrag zwischen den Parteien DIE LINKE, SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN für die 6. Wahlperiode des Thüringer Landtags.

⁴ Landesentwicklungsprogramm Thüringen 2025. „Thüringen im Wandel“.

⁵ Leipziger Institut für Energie GmbH (2018), „Abschlussbericht zur Erarbeitung einer Integrierten Energie- und Klimaschutzstrategie Thüringens“

⁶ TMUEN (2018), <https://klimastrategie-thueringen.de/ieks/de/home/news/single/id/39> (Zugriff: 29.08.2018)

⁷ Leipziger Institut für Energie GmbH (2016), „Gutachten zur Vorbereitung einer Energie- und Klimaschutzstrategie für Thüringen“.

- eine deutliche Zunahme der Elektromobilität und
- eine Deckung des zu erwartenden Bruttostromverbrauchs von 15,8 TWh aus erneuerbaren Energien und zusätzliche Produktion von 12,5 TWh regenerativen Stroms

eine rein rechnerische bzw. bilanzielle Deckung des Primärenergieverbrauchs aus 100% erneuerbaren Energien bis 2040. Ohne zusätzliche Maßnahmen bliebe damit jedoch im Jahr 2040 ein energetischer Bedarf von 45 PJ bzw. 12,5 TWh an fossilen Brenn- und Kraftstoffen weiterhin bestehen, der durch eine zusätzliche regenerative Stromerzeugung innerhalb der Energiebilanz ausgeglichen werden müsste (Export erneuerbaren Stroms). Es wird davon ausgegangen, dass die verfügbaren heimischen Energiepotenziale nicht für eine vollständige Substitution der fossilen Energieträger Erdgas und Mineralöle genügen. Zur Erreichung einer realen 100-prozentigen Deckung des Energiebedarfs aus erneuerbaren Energien wird deshalb empfohlen:

- ab 2025 mit der verstärkten Anwendung von Power-to-X-Technologien zu beginnen, um fossile Energieträger bis 2040 vollständig durch CO₂-neutrale Brenn- und Kraftstoffe zu ersetzen und
- einen deutlich stärkeren Ausbau erneuerbarer Energien voranzutreiben, um den daraus entstehenden zusätzlichen Bruttostrombedarf von 16,7 TWh (d. h. insgesamt: 32,5 TWh) zu decken.

Als Alternative oder ergänzende Option zu synthetischem Erdgas und erneuerbaren Kraftstoffen wird außerdem die Produktion von Wasserstoff über Power-to-X-Technologien zum Aufbau einer auf Wasserstoff basierenden Wirtschaft erwähnt. Weiterhin wird im Gutachten davon ausgegangen, dass die nach 2040 weiterhin

voranschreitende Verbreitung der Elektromobilität und die weiter steigende Energieproduktivität in allen Bereichen, die Notwendigkeit der Produktion synthetischer Brenn- und Kraftstoffe reduziert. Deshalb wird von den Autoren des Gutachtens empfohlen, die dann überschüssige Produktion an Power-to-X-Energieträgern zunehmend in Langzeitspeichern zu konservieren.

Im Ergebnis stellt das Gutachten bei erfolgreicher Umsetzung des empfohlenen Zielszenarios bis 2040 eine Verringerung des thüringischen Treibhausgas-Ausstoßes um mindestens 90% im Vergleich zu 1990 in Aussicht. Zusätzlich wird als Folge dieses Szenarios die vorhandene Abhängigkeit von Energieimporten aus anderen Bundesländern und dem Ausland reduziert bzw. sogar vollständig durch eigene Energiegewinnung ersetzt. Im Vergleich dazu sieht der seit Januar 2018 vorliegende Entwurf des „Thüringer Klimagesetzes“ eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 60 bis 70% bis 2030, um 70 bis 80% bis 2040 und um 80 bis 95% bis 2050 im Vergleich zum Emissionsniveau von 1990 vor.⁸

In der Thüringer Innovationsstrategie (RIS3) sind im Innovationsfeld „Nachhaltige Energie und Ressourcenverwertung“ die Bereiche Erneuerbare Energien und Energiespeicher fest verankert.

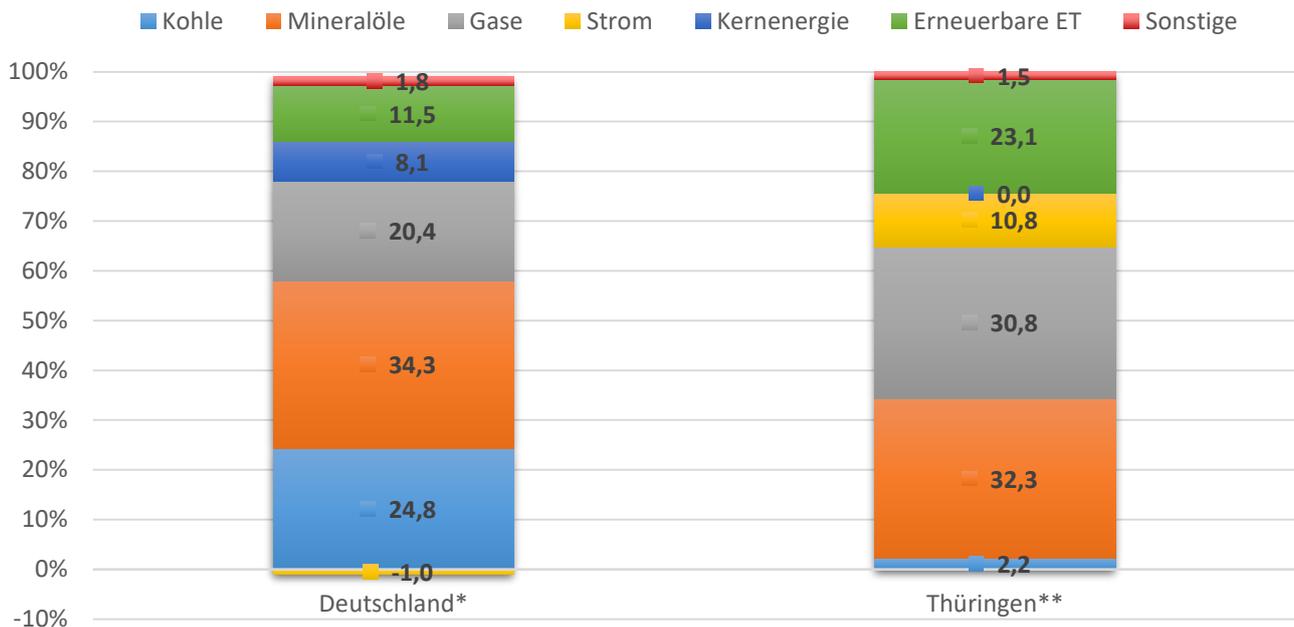
Parlament und Rat und Kommission der EU haben im Dezember 2018 beschlossen, die Doppelbelastung mit Steuern und Abgaben für Energiespeicher bei Netzdienstleistungen abzuschaffen.⁹ Damit wird laut BVES 2019 ein zentrales Hemmnis für den Ausbau von Speichern in Deutschland beseitigt.¹⁰ Ferner haben EU-Kommission, Rat und Parlament in der Renewable Energy Directive (RED II) festgelegt, dass erneuerbare Eigenverbraucher inkl. Speicher bis zu 30 kWp nicht mehr diskriminiert und mit Abgaben belastet werden dürfen.¹¹ Die Bundesregierung ist aufgefordert, die Richtlinien innerhalb von 18 Monaten in nationales Recht zu überführen.

⁸ Thüringer Landtag (2018), „Thüringer Gesetzes zum Klimaschutz und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels“ (Drucksache 6/4919).

⁹ <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-5076-2019-INIT/en/pdf> (Zugriff 18.06.2019).

¹⁰ https://www.bves.de/eu_speicher-doppelbelastung_trilogergebnis-2/

¹¹ <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive> (Zugriff 18.06.2019)

Abbildung 2.1. Energiemix in Thüringen und Deutschland gemessen am Primärenergieverbrauch (2014).

Quelle: Eigene Darstellung^{12, 13}

2.2 Technische und strukturelle Rahmenbedingungen

2.2.1 Energieverbrauch und Energiemix in Thüringen

Gemäß der derzeit aktuellsten Energiebilanz für Thüringen des Länderarbeitskreises Energiebilanzen¹⁴ lag das Primärenergieaufkommen Thüringens im Jahr 2014 bei 232.538 TJ bzw. 64,6 TWh. Von diesen wurden 54.635 TJ bzw. 15,2 TWh im Land gewonnen und 177.825 TJ bzw. 49,4 TWh (d. h. 76,5% des Gesamtaufkommens) aus anderen Bundesländern oder dem Ausland importiert. Der Endenergieverbrauch lag dagegen bei 202.701 TJ bzw. 56,3 TWh. Somit wurden 87,2% der Primärenergie schließlich als Endenergie in den verschiedenen Energiesektoren verbraucht. Die auf die verschiedenen Energieträger aufgeschlüsselte Zusammensetzung des Primärenergieverbrauches verzeichnet in Übereinstimmung mit den energie- und klimapolitischen Bestrebungen der Bundesrepublik auch in Thüringen seit 1990 einen beständigen Anstieg des Anteils erneuerbarer Energieträ-

ger am gesamten Primärenergieverbrauch. Dieser Anteil ist im Freistaat in den vergangenen Jahrzehnten von 0,6% (1990) auf 23,1% (2014) gestiegen. Bezogen auf den Endenergieverbrauch lag der Anteil erneuerbarer Energien im Jahr 2014 insgesamt bei etwa 18,1%.

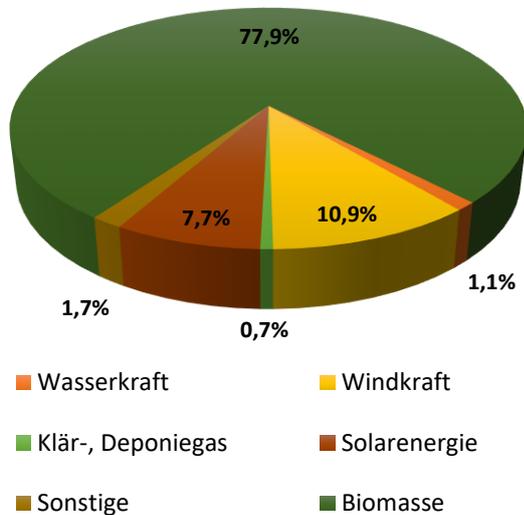
Abbildung 2.1 zeigt den Energiemix Thüringens im Vergleich zum Energiemix Deutschlands im Jahr 2014 (gemessen am Primärenergieverbrauch). Abgesehen von dem fehlenden Anteil an Kernenergie, zeigen sich vor allem Unterschiede im Anteil der Kohlen, dem Anteil der Gase und dem Anteil der erneuerbaren Energieträger. Während Kohle mit 2,2% in Thüringen im Vergleich zum Kohlenanteil von 25,1% in der Bundesrepublik vernachlässigbar gering ist, ist der Anteil von Gasen und erneuerbaren Energieträgern am thüringischen Energiemix jeweils über 10% höher als im Energiemix des Bundes. In der CO₂-Emmission schlägt sich der starke Rückgang der Verwendung von Kohle, der 1990 noch 65,9% des Pri-

¹² AG Energiebilanzen e.V. (2016), „Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2015“.

¹³ Länderarbeitskreis Energiebilanzen (2016), Energiebilanz Thüringen 2014.

¹⁴ Länderarbeitskreis Energiebilanzen (2016), Energiebilanz Thüringen 2014.

Abbildung 2.2. Anteil der einzelnen erneuerbaren Energieträger am Primärenergieverbrauch aus erneuerbaren Energieträgern in Thüringen insgesamt (2014).



Quelle: Eigene Darstellung¹⁵

märenergieverbrauchs ausmachte, in einem Rückgang von 34,0 Millionen Tonnen (1990) auf 16,9 Millionen Tonnen (2013) CO₂ nieder.

Abbildung 2.2 zeigt die Aufschlüsselung des Primärenergieverbrauchs aus den Erneuerbaren auf die unterschiedlichen Energieträger im Jahr 2014. Biomasse macht mit 77,9% demnach den mit Abstand größten Anteil an erneuerbaren Energieträgern aus, während Windkraft mit 10,9%, Solarenergie mit 7,7%, Wasserkraft (ohne Pumpspeicherkraft) mit 1,1% und Klär-/ Deponiegas mit 0,7% in die Bilanz eingehen. Sonstige Energieträger (Geothermie, Solarthermie, Pumpspeicherkraft) machten etwa 1,7% aus. Betrachtet man nur die Bruttostromerzeugung, so ist der Anteil erneuerbarer Energien von 4,3% (1991) auf 54,9% (2014) des in Thüringen erzeugten Bruttostroms gestiegen, wobei die Stromgewinnung aus Pumpspeicherkraftwerken hierbei nicht eingerechnet wurde. Die Bruttostromerzeugung im thüringischen Inland belief sich im Jahr 2014 insgesamt auf 8,4 TWh, wohingegen der Stromverbrauch bei

12,5 TWh lag. Der Freistaat kann somit nur etwa zwei Drittel seiner elektrischen Endenergie aus eigener Gewinnung decken und muss den Rest entsprechend importieren. Abbildung 2.3 veranschaulicht den Anteil der verschiedenen erneuerbaren Energieträger (ohne Pumpspeicherkraftwerke) an der Bruttostromerzeugung im Jahr 2014. Aus Windkraft und Solarenergie wurden zusammen 55,6% des Stroms gewonnen, während Biomasse (Biogas, feste und flüssige biogene Stoffe, biogener Abfall) weitere 40,2% ausmachte. Wasserkraft steuerte 3,6% zur Bruttostromerzeugung bei.

Es lässt sich zusammenfassen, dass Thüringen im Vergleich zum Bund einen überdurchschnittlich hohen Anteil erneuerbarer Energieträger aufweist. Allerdings geht dies einher mit sehr hohen Energieimporten, die derzeit notwendig sind, um die energetische Versorgung des Freistaates abzudecken. Zwar wurden rechnerisch die CO₂ Emissionen im Bundesland gemäß dem Quellenprinzip seit 1990 halbiert, jedoch darf in Bezug auf die klimapolitischen Ziele nicht vernachlässigt werden, dass die notwendigerweise importierte Primärenergie dennoch außerhalb Thüringens entsprechend des dort vorhandenen Energiemixes CO₂-Emissionen verursacht.

2.2.2 Energiesektoren und Energienetze

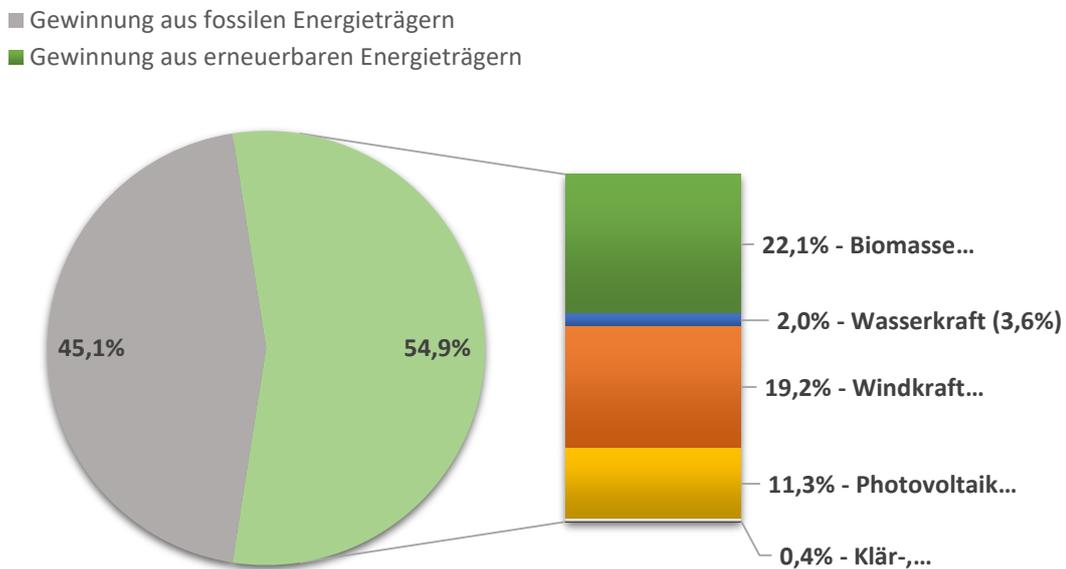
Die gewonnene und importierte Energie wird in den unterschiedlichsten Bereichen genutzt. Sterner und Stadler¹⁶ teilen den gesamten Energiebereich in vier Sektoren ein, die sich aus den physikalisch-chemischen Zuständen der Energieträger ergeben, die am häufigsten zum Einsatz kommen. Sie unterscheiden

- den **Elektrizitäts-/Stromsektor**,
- den **Wärmesektor**,
- den **Gassektor** und
- den **Verkehrs-/Kraftstoffsektor**.

¹⁵ Länderarbeitskreis Energiebilanzen (2016), Energiebilanz Thüringen 2014.

¹⁶ Sterner & Stadler (2017), Energiespeicher - Bedarf, Technologie, Integration. 2. Auflage, Springer-Verlag, Deutschland.

Abbildung 2.3. Anteile der fossilen und erneuerbaren Energieträger an der Bruttostromerzeugung in Thüringen (ca. 8,4 TWh), sowie Aufschlüsselung der Anteile der einzelnen erneuerbaren Energieträger am erneuerbaren Bruttostrom (2014). Die eingeklammerten Werte am Balkendiagramm geben den prozentualen Anteil der einzelnen erneuerbaren Energieträger an der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern an.



Quelle: Eigene Darstellung (FSU Jena)¹⁵

In Hinblick auf die Energiespeicherung können jedem dieser Sektoren verschiedene Energiespeichertechnologien zugeordnet werden, auf die in Kapitel 3 dieser Studie noch näher eingegangen wird. Dabei bietet der Einsatz eben dieser Energiespeichertechnologien und der wachsende Anteil erneuerbarer Energien am Energiemix großes Potential zur sogenannten Sektorkopplung, d. h. dem effizienten Austausch von Energie zwischen mindestens zwei der Sektoren je nach momentanem Energiebedarf und -angebot in den einzelnen Sektoren. Konkret bedeutet dies, dass die aus einem Sektor stammende Energie je nach Verbrauchsnachfrage oder Energiespeicherkapazität effizient in die Energieformen eines anderen Sektors umgewandelt wird und dort direkt genutzt oder zur späteren Weiterverwendung (in diesem oder einem weiteren Sektor) gespeichert wird. Die Sektorkopplung stellt dabei nicht nur ein technologisches Potential, sondern eine ökonomische und ökologi-

sche Notwendigkeit dar, um zu einem in seiner Gesamtheit effizienten und nachhaltigen Energiesektor auf der Basis erneuerbarer Energien zu gelangen. Einige der Potentiale der Sektorkopplung unter Ausnutzung bestehender Energiespeichertechnologien werden in Kapitel 3 kurz andiskutiert. Zunächst sollen jedoch die technischen Grundlagen der Energieverteilung der einzelnen Sektoren im Freistaat näher betrachtet werden.

Um hinreichend große Mengen an Energie vom Ort der Erzeugung zum Ort des Verbrauches zu transportieren, benötigt es ein gut ausgebautes und leistungsfähiges Verteilersystem. Diese räumliche Verteilung der Energie ist die Aufgabe des Energienetzes, wobei jedem Sektor prinzipiell ein eigenes Energienetz zugeordnet werden kann. Grundsätzlich besteht ein solches Energienetz notwendigerweise aus den **Erzeugern**, welche Energie aus einer Energiequelle gewinnen und in das Energienetz einspeisen, den **Verbrauchern**, welche die gewonnene

Energie abnehmen und nutzen, unter Umständen verschiedenen **Netzebenen**, die eine effiziente räumliche Umverteilung zwischen Erzeugern und Verbrauchern auf unterschiedlichen Distanzen gestattet und – zumindest im Falle des Stromnetzes – aus weiteren technologischen Vorkehrungen, welche die sogenannten **Systemdienstleistungen** bereitstellen und den sicheren und stabilen Betrieb des Netzes zu jeder Zeit gewährleisten.

2.2.3 Stromsektor in Thüringen

2.2.3.1 Stromgewinnung und Stromverbrauch

Die Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur erfasst alle Kraftwerke in Deutschland einzeln, welche eine Erzeugerleistung von mindestens 10 MW besitzen.¹⁷ Weiterhin werden alle Kraftwerke, die nach EEG vergütungsfähig sind und mit weniger als 10 MW operieren, in Summe und getrennt nach Art des Energieträgers erfasst.

Mit Stand vom Ende des ersten Quartals 2017 sind gemäß der Bundesnetzagentur in Thüringen 65 Kraftwerke mit einer Erzeugerleistung von jeweils mindestens 10 MW in Betrieb, welche insgesamt eine Leistung von 2.794 MW liefern. Hinzu kommen weitere Kleinkraftwerke (< 10 MW Erzeugerleistung) mit einer Gesamtleistung von 1.981 MW, woraus sich in Thüringen eine elektrische Gesamterzeugerleistung von etwa 4.775 MW ergibt. Gemäß der vom Länderarbeitskreis Energiebilanzen veröffentlichten Energiebilanz für das Jahr 2014 (Stand: Juli 2016) wurden in Thüringen 8,4 TWh an Bruttostrom erzeugt, von denen 4,6 TWh bzw. 55% aus erneuerbaren Energieträgern gewonnen wurden. Demgegenüber stand ein Endenergieverbrauch von insgesamt 12,5 TWh.¹⁸

Auf Grund des fortschreitenden Ausbaus erneuerbarer Energien wird die Anzahl an Kraftwerken (Windräder,

Photovoltaikanlagen etc.) und damit auch der Steuerungs- und Monitoringaufwand sowie die Auslastung des Stromnetzes zukünftig stark zunehmen.

2.2.3.2 Aufbau des Stromnetzes

Das deutsche Stromnetz lässt sich grob in ein Übertragungsnetz und ein Verteilernetz unterteilen, wobei letzteres wiederum aus verschiedenen Netzebenen besteht, die mit unterschiedlichen elektrischen Spannungen operieren. Das Thüringer Stromnetz ist selbstverständlich ein Teil dieses Gesamtnetzes.

Das **Übertragungsnetz** (auch Höchstspannungsnetz) arbeitet mit 220 kV oder 380 kV und hat eine Gesamtlänge von 35 000 km.¹⁹ Als Teil des europäischen Verbundnetzes ermöglicht es den Import und den Export von Strom aus und in das europäische Ausland. Seine Hauptfunktion ist jedoch die bundesweite Übertragung von Strom über große Distanzen hinweg zu den Verteilernetzen.

Die **Verteilernetze** sind untergliedert in Hochspannungsnetze (220 bis 60 kV), Mittelspannungsnetze (60 kV bis 6 kV) und Niederspannungsnetze (400 V oder 230 V). Diese drei Ebenen dienen der Verteilung des Stroms hin zu Ballungszentren oder stromintensive Industriegebiete (Hochspannungsnetz), an regionale Transformatorstationen in Kleinstädten und ländlichen Netzgebieten oder direkt zu mittelgroßen Einrichtungen (Mittelspannungsnetz) und schließlich direkt zum Endverbraucher in den privaten Haushalten, kleineren Industriebetrieben und anderen kleineren Einrichtungen (Niederspannungsnetz). Von Hoch- zu Niederspannung steigt also notwendigerweise die Feingliedrigkeit des Netzes auf Grund der Vielzahl kleinerer Verbraucher. Aus diesem Grund ist das Niederspannungsnetz mit bundesweit insgesamt knapp 1,12 Mio. Kilometer mehr als doppelt so lang wie das Mittelspannungsnetz (479 000

¹⁷ Bundesnetzagentur (2017), Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur (Stand: 31.03.2017).

¹⁸ Länderarbeitskreis Energiebilanzen (2016), Energiebilanz Thüringen 2014.

¹⁹ Netzentwicklungsplan Strom (2017), <https://www.netzentwicklungsplan.de/de/wissen/stromnetze> (Zugriff: 29.08.2018).

km) und fast 15-mal so ausgedehnt, wie das Hochspannungsnetz (77 000 km).²⁰ Neben Kraftwerken unterschiedlicher Größe, die auf jeder der vier Netzebenen auf der Erzeugerseite zu finden sind und Strom in die Teilnetze einspeisen, existiert eine Vielzahl von Umspannwerken und Schaltanlagen im Stromnetz. Sie sorgen als Knotenpunkte des Netzes für die Umwandlung (Transformation) von elektrischer Spannung zwischen den verschiedenen Netz-/Spannungsebenen und ermöglichen es so überhaupt erst, dass die elektrische Energie der Erzeuger auf verschiedenen Netzebenen transportiert und zwischen diesen ausgetauscht werden kann. Verwaltungstechnisch ist das Übertragungsnetz deutschlandweit in vier Netzbereiche unterteilt, die von den vier großen Übertragungsnetzbetreibern Tennet TSO, 50Hertz Transmission, Amprion und TransnetBW verwaltet werden. Das Thüringer Übertragungsnetz fällt – wie die Übertragungsnetze aller neuen Bundesländer – unter den Zuständigkeitsbereich von 50Hertz Transmission. Der Betrieb der Verteilernetze ist auf Grund ihrer Feingliedrigkeit und bezogen auf die vergleichsweise geringen Energiemengen je Transportstrecke um ein Vielfaches kostenintensiver und verwaltungstechnisch aufwendiger, als der Betrieb der Übertragungsnetze. Entsprechend ist die Anzahl der Verteilernetzbetreiber um ein Vielfaches höher, als die Anzahl der Übertragungsnetzbetreiber. In der Regel sind private und kommunale Energieversorgungsunternehmen, wie Stadt- und Gemeindewerke, für den Betrieb und den Ausbau des Netzes auf Verteilernetzebene verantwortlich. Mit knapp 33.000 km Gesamtnetzlänge ist die 2006 gegründete TEN Thüringer Energienetze GmbH & Co. KG der größte Verteilernetzbetreiber in Thüringen.²¹ Als eine 100-Prozent-Tochter der Thüringer Energie AG ist sie im

Zuge einer Rekommunalisierung 2013 in kommunalen Besitz übergegangen, was den Großteil des Thüringer Stromnetzes wieder unter staatliche Verantwortung gestellt hat. Weiterhin listet die Bundesnetzagentur 30 weitere Netzbetreiber innerhalb des Freistaates.²²

2.2.3.3 Systemdienstleistungen

Systemdienstleistungen sind alle Netzdienste, die ein Übertragungsnetzbetreiber bereitstellen muss um ein stabiles und ausfallsicheres Stromnetz zu gewährleisten. Die Deutsche Energie-Agentur (dena) ordnet den Systemdienstleistungen die Frequenzhaltung, die Spannungshaltung, die Versorgungswiederaufnahme (= Schwarzstart) und die Betriebsführung zu.²³ Dabei sind die maßgeblichen Werkzeuge, um diese Systemdienstleistungen zu gewährleisten, verschiedene Arten von Regelleistungen, die Netzanalyse, das Netzmonitoring und das Einspeisemanagement. Die Netzfrequenz des Stromnetzes ist im gesamten europäischen Stromnetz auf einen Sollwert von 50 Hz festgelegt. Die Abweichung zwischen diesem Sollwert und dem tatsächlichen Ist-Wert stellt ein Maß für das systemweite Gleichgewicht zwischen momentaner Stromerzeugung und momentanem Stromverbrauch dar. Steigt der Wert des Stromverbrauchs über denjenigen der Stromerzeugung, sinkt die Netzfrequenz, während bei einem Überangebot an Stromerzeugung die Netzfrequenz steigt. Wird die Diskrepanz zwischen Stromerzeugung und -verbrauch zu groß, kann dies im schlimmsten Fall zu einem Zusammenbruch des gesamten Netzes (Black-out) führen. Die **Frequenzhaltung** hat deswegen zum Ziel diese Diskrepanz innerhalb eines sicheren Schwankungsrahmens von $50 \pm 0,2$ Hz zu halten. Dazu muss im Netz sogee-

²⁰ Deutsche Energie-Agentur (2017), <https://www.dena.de/themen-projekte/energiesysteme/stromnetze/> (Zugriff: 29.08.2018).

²¹ TEN Thüringer Energienetze GmbH & Co. KG (2017) https://www.thueringer-energienetze.com/Unternehmen/Ueber_uns/Daten_und_Fakten.aspx (Zugriff: 29.08.2018).

²² Bundesnetzagentur (2017), https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/DatenaustauschundMonitoring/UnternehmensStammdaten/Uebersicht_Netzbetreiber/UebersichtStromUndGasnetzbetreiber_node.html (Zugriff: 29.08.2018).

²³ Deutsche Energie-Agentur (2014), „dena-Studie Systemdienstleistungen 2030. Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien“.

nannte **positive und negative Regelleistung** vom Übertragungsnetzbetreiber bereitgestellt werden. Positive Regelleistung kann bei erhöhtem Stromverbrauch eine zusätzliche Menge an Strom ins Netz einspeisen und auf diese Weise eine zu geringe Stromerzeugung ausgleichen, während negative Regelleistung ein Überangebot an Strom auffangen und so aus dem Netz entfernen kann. Regelleistung ist mehrstufig aufgebaut und man unterscheidet die Momentanreserve, die Primärregelleistung, die Sekundärregelleistung und die Minutenreserve.

Die **Momentanreserve** dient dem momentanen Ausgleich von Störungen. Sie wird u. a. durch die rotierenden Teile in Erzeugersystemen ohne Verzögerung bei einer Störung bereitgestellt. Solche „rotierenden Teile“ können die tatsächlich in konventionellen Kraftwerken rotierenden Schwungmassen (Rotoren) der Turbinen sein, die auch bei kurzzeitigen Verbrauchsspitzen durch die Massenträgheit ihrer Rotationsbewegung Energie ins Netz einspeisen können. Aber auch in magnetischen Feldern gespeicherte Energie von Spulen gespeicherte Energie oder ähnliches kann Momentanreserve darstellen. **Primärregelung** löst die Momentanreserve innerhalb von 30 Sekunden nach Störungseintritt ab und muss für mindestens 15 min ausreichend Regelleistung ins Netz einspeisen können, was im heutigen Stromnetz durch Hochregelung oder Drosselung der Erzeugungsleistung konventioneller Kraftwerke gewährleistet wird. Innerhalb von fünf Minuten nach Auftreten einer Störung ist die **Sekundärregelung** vollständig aktiviert, welche positive oder negative Regelleistung durch schnell aus dem Ruhezustand hochfahrbare Kraftwerke (insbesondere Pumpspeicherkraftwerke und Gasturbinenkraftwerke) über mindestens eine Stunde bereitstellt. Längere Störungen werden schließlich von der **Minutenreserve** (auch **Tertiärregelung**) ausgeglichen, welche

nach 15 min vollständig aktivierbar sein muss und automatisch oder fernmündlich vom Übertragungsnetzbetreiber abgerufen werden kann.

Sekundärregelleistung und Minutenreserve werden dabei an Strommärkten in einem Auktionsverfahren vermarktet, wobei die Dienstleister jeweils für Bereithaltung und tatsächliche Bereitstellung von Regelleistung vergütet werden.

So wie die Netzfrequenz auf einen festen Soll-Wert festgelegt und dessen Einhaltung durch Regelmechanismen gesichert ist, wird die Netzspannung im europäischen Verbundnetz auf einen Soll-Wert von 230 V geregelt. Wie für die Frequenz ist eine Realisierung dieses Sollwertes maßgeblich für die Stabilität und die Sicherheit des Netzes und der an das Netz als Verbraucher angeschlossenen Geräte. Diese Netzspannung in einem Toleranzrahmen von $230 \pm 23 \text{ V}$ ($\pm 23 \text{ V}$ entsprechen $\pm 10\%$) zu halten, ist das Ziel der **Spannungshaltung**.²⁴ Dies ist eine sehr komplexe Aufgabe, da nicht nur die von den Kraftwerken bereitgestellte Spannung geregelt werden muss, sondern auch Spannungsabfälle oder -anstiege über die Leitungen der Netze und in den verschiedenen Netzebenen beachtet werden müssen. Zur Erfüllung dieser Regelungsaufgaben werden auf technischer Seite die in der Wechselstromtechnik (und damit auch im Stromnetz) vorhanden Blindströme genutzt, welche durch induktive (z. B. Spulen) und kapazitive (z. B. Kondensatoren) Wechselstromeffekte kompensiert werden können. Diese Blindstromkompensation ist damit ein wichtiges Werkzeug der Spannungshaltung. Zusätzlich muss das Netz nicht nur hinsichtlich der Blindströme ausreichend gut konzipiert sein, sondern muss ebenfalls für eine hinreichend hohe Kurzschlussleistung ausgelegt sein, um in einem Störfall notwendige Sicherheitsmechanismen zum Schutz des Netzes vor Zerstörungen auslösen zu können.

²⁴ Norm zur Netzspannung, DIN EN 60038 VDE 0175-1:2012-04 CENELEC-Normspannungen.

Nach einem Totalausfall eines Kraftwerkes, eines regionalen Netzes oder des gesamten Netzes (Black-out) muss eine Reihe von Maßnahmen außerdem die Fähigkeit zu einer möglichst schnellen **Versorgungswiederaufnahme** gewährleisten. Insbesondere sind zu diesem Zweck Kraftwerke mit sogenannter Schwarzstartfähigkeit nötig, d. h. Kraftwerke, die nicht auf eine äußere Zufuhr von Energie anderer Kraftwerke angewiesen sind, um ihren vollständigen Betrieb nach einem Ausfall wieder aufnehmen zu können.

Die Bereitstellung dieser Systemdienstleistungen wird im derzeitigen Stromnetz zu großen Teilen von konventionellen Kraftwerken erbracht. Der Wandel zu einer auf erneuerbaren Energien basierenden Stromversorgung hat nicht nur einen massiven Wegfall dieser konventionellen Systemdienstleistungen zur Folge, sondern verstärkt ebenso den Bedarf an Systemdienstleistungen durch die mit Wind- und Sonnenenergie einhergehenden starken Fluktuationen in der Stromerzeugung. Dies zieht die Notwendigkeit nach sich, alternative und neue Flexibilitätsoptionen zur Sicherung der Netzstabilität und Netzsicherheit zu etablieren.

2.2.4 Wärmesektor in Thüringen

2.2.4.1 Wärmegewinnung und Wärmeverbrauch

Gemäß der vom Länderarbeitskreis Energiebilanzen veröffentlichten Energiebilanz für das Jahr 2014 (Stand: Juli 2016) wurden in Thüringen ohne Umwandlungsverluste etwa 3,9 TWh an Fernwärme aus Kraftwerken im Inland gewonnen, von denen 2,5 TWh aus Kraftwärmekopplung, 1,3 TWh aus Heizwerken und 0,2 TWh aus Windkraft-, Photovoltaik- und anderen Anlagen stammten. Demgegenüber stand ein Fernwärmeendenergieverbrauch von etwa 3,0 TWh, der insgesamt zu 26% aus erneuerbaren Energieträgern (fast ausschließlich Biomasse) gedeckt wurde.²⁵

Bei der **Solarthermie** liegt Thüringen mit einer Gesamtkollektorfläche von 548.500 m² und einer Kollektorflächendichte von 33,9 m² Kollektorfläche je km² des Landes im Ländervergleich im unteren Drittel des Rankings.²⁶ Die erzeugte Wärmemenge aus dieser Quelle beträgt seit 2014 kontinuierlich etwa 0,2 TWh pro Jahr.

2.2.4.2 Aufbau des Wärmenetzes

Das Wärmenetz unterteilt sich im Allgemeinen in **Nahwärmenetze** und **Fernwärmenetze**, die Wärme durch in Heizkraftwerken oder Heizwerken erhitztes Wasser (oder in sehr seltenen Fällen auch durch heißen Dampf) zu den Verbrauchern transportieren. Dort wird dem Wasser über Wärmetauscher die Wärme entzogen und das abgekühlte Wasser über Rücklaufleitungen wieder zum Wärmeezeuger zur erneuten Erhitzung zurückgeleitet. Während Nahwärmenetze die Wärme über kurze Strecken verteilen, dienen Fernwärmenetze der Überwindung größerer Distanzen. Der Übergang zwischen den Netzformen ist fließend und nicht scharf definiert, da es grundsätzlich keine gravierenden technologischen Unterschiede zwischen beiden Netzformen gibt. Die Fernwärmenetze sind innerhalb Thüringens dezentral in Ballungszentren konzentriert. Dabei gibt es 58 wasserbasierte Fernwärmenetze (Dampfnetze sind vernachlässigbar) mit einer Trassenlänge von insgesamt etwa 470 km und 4.114 Hausübergabestationen, deren angeschlossene Leistung etwa 1.050 MW beträgt (Stand 2015).²⁷

2.2.5 Gassektor in Thüringen

2.2.5.1 Gasgewinnung und Gasverbrauch

Erdgasvorkommen in Thüringen selbst sind gegenüber dem Erdgasaufkommen des Bundeslandes verschwindend gering. Dennoch wird aktuell im Thüringer Becken

²⁵ Länderarbeitskreis Energiebilanzen (2016), Energiebilanz Thüringen 2014.

²⁶ Agentur für erneuerbare Energie e.V. (2016), Webportal „Föederal Erneuerbar“, https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/TH/kategorie/solar/auswahl/195-solarthermie_kollekt/#goto_195 (Zugriff: 29.08.2018).

²⁷ AGFW Hauptbericht (2015).

Erdgas gefördert. Im Jahr 2014 belief sich die Fördermenge insgesamt auf etwa 19,8 Millionen Nm³ Rohgas, was 0,2% des in Deutschland insgesamt geförderten Rohgasvolumens und einer Primärenergiemenge von rund 0,2 TWh entspricht (Heizwert: 9,77 kWh je m³). Die noch verbleibenden Reingasreserven im Freistaat werden derzeit (Stand 2016) auf 53 Millionen Nm³ geschätzt.^{28, 29, 30}

Zur Gewinnung von synthetischem Erdgas bzw. **Biomethan** existieren in Thüringen neun (von insgesamt 278) Biogasanlagen, die das erzeugte Biomethan nach entsprechender Aufbereitung in das Erdgasnetz einspeisen. Die Einspeisekapazität liegt bei 4.300 Nm³ je Stunde, was bei einem durchschnittlichen Betrieb von 7.230 Volllaststunden einer Menge von etwa 31,1 Millionen Nm³ und einer Primärenergiemenge von 0,3 TWh (Heizwert: 9,96 kWh je m³) entspricht.³¹ Gemäß dieser statistischen Erhebung wird in Thüringen bereits jetzt mehr synthetisches als fossiles Erdgas aus inländischen Quellen gewonnen. Demgegenüber stand im Vergleichsjahr 2014 ein gesamter Erdgasverbrauch, der einer Primärenergiemenge von 19,4 TWh entsprach.³² Zusätzlich dazu ist anzumerken, dass auf Grund der letzten EEG-Novelle 2014 der Zubau von Biogasanlagen seit 2015 nahezu vollständig zum Stillstand gekommen ist.³¹

2.2.5.2 Aufbau des Erdgasnetzes

Das **Erdgasnetz** ist ähnlich wie das Stromnetz in ein für den überregionalen Transport zuständiges Netz, das **Fernleitungsnetz**, und in ein für die regionale Verteilung an die Endverbraucher dienendes Netz, das **Verteilernetz**, untergliedert. Dabei wird das Erdgas in den Fernleitungen (auch „Hochdruckleitungen“) bei hohem Druck von bis zu 100 bar über große Strecken bis zu den

Verteilnetzen transportiert. In den Verteilnetzen wird das Gas je nach Größe bei Drücken von bis zu 16 bar (in der Regel 4 bar) übertragen.

Verwaltungstechnisch wird das Fernleitungsnetz in Thüringen hauptsächlich durch die drei Fernleitungsnetzbetreiber Ferngas Netzgesellschaft mbH, Ontras Gastransport GmbH und GASCADE Gastransport GmbH betrieben. Auf der untergeordneten Verteilernetzebene ist die TEN Thüringer Energienetze GmbH & Co. KG mit einer gesamten Gasnetzlänge von ca. 6.000 km der größte Netzbetreiber. Weiterhin listet die Bundesnetzagentur 30 weitere Verteilnetzbetreiber im Gassektor (Stand: Mai 2017).³³

2.2.6 Verkehrssektor in Thüringen

2.2.6.1 Mineralölgewinnung und Mineralölverbrauch

In Thüringen selbst gibt es keine Erdölförderung. Mineralöle werden deswegen zu 100% importiert. Demgegenüber stand im Jahr 2014 ein thüringischer Mineralölverbrauch, der einer Primärenergiemenge von etwa 15,2 TWh entspricht.³²

2.2.6.2 Aufbau der Kraftstoffverteilungsinfrastruktur

Das **Rohstoffverteilungsnetz** im Verkehrssektor basiert zum Teil auf **Rohöl-/Produktleitungen** und zum Teil auf **Güterverkehr** auf der Straße oder der Schiene. Gemäß der in dieser Studie durchgeführten Recherchen, existieren in Thüringen selbst mangels großer Raffinerien jedoch keine Fernleitungen. Es ist deswegen davon auszugehen, dass der Großteil der Mineralölverteilung per Tanklastwagen und Zügen bewerkstelligt wird.

²⁸ Landesamt Bergbau, Energie und Geologie (2014), Jahresbericht „Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland“.

²⁹ Landesamt Bergbau, Energie und Geologie (2016), Jahresbericht „Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland“.

³⁰ Länderarbeitskreis Energiebilanzen (2014), Heizwerttabelle.

³¹ Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft (2017), „Integration der Biogaserzeugung in die Landwirtschaft Thüringens“.

³² Länderarbeitskreis Energiebilanzen (2016), Energiebilanz Thüringen 2014.

³³ Bundesnetzagentur (2017), https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/DatenaustauschundMonitoring/UnternehmensStammdaten/Uebersicht_Netzbetreiber/UebersichtStromUndGasnetzbetreiber_node.html (Zugriff: 29.08.2018).

2.3 Implikationen für einen Strukturwandel im Thüringer Energienetz

Der starke Ausbau erneuerbarer Energien bis 2040 stellt erhöhte Anforderungen an das Energienetz, welche Anpassungen der Netzinfrastruktur an die neuen Gegebenheiten erfordern, um auch in Zukunft die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Bei den anstehenden Herausforderungen lassen sich dabei zwei Kernprobleme erkennen. Zum einen sind die Einsatzmöglichkeiten spezifischer erneuerbarer Energietechnologien teils stark von lokalen geografischen und klimatischen Gegebenheiten abhängig, sodass bestimmte Technologien zur Energiegewinnung nur an gewissen Orten wirtschaftlich und effizient eingesetzt werden können. Dies schafft die Notwendigkeit, die Energie überregional von den Erzeugerzentren zu den Lastzentren zu transportieren. Zum anderen hat die lokal stark schwankende Verfügbarkeit einiger erneuerbarer Energieträger eine – im Gegensatz zu konventioneller Energiegewinnung nicht steuerbare – zeitliche Verschiebung von Energiegewinnung und Energieverbrauch zur Folge. Sowohl die zeitliche, als auch die räumliche Diskrepanz zwischen Erzeugung und Verbrauch gefährden die Deckung der Grundlast und die Stabilität des Energienetzes. Dem muss durch Integration von Flexibilitätsoptionen in die Energienetze der Sektoren entgegengewirkt werden. Grundsätzlich ändern sich durch die Energiewende und die mit ihr einhergehende Dezentralisierung der Energiegewinnung die strukturellen Anforderungen an die Energienetze insgesamt. Abbildung 2.4 soll in vereinfachter Weise die strukturellen Änderungen im Netz veranschaulichen.

2.3.1 Anforderungen an das Stromnetz

Im Stromsektor dienen die Übertragungsnetze der überregionalen Verteilung von Strom. In einem auf erneuer-

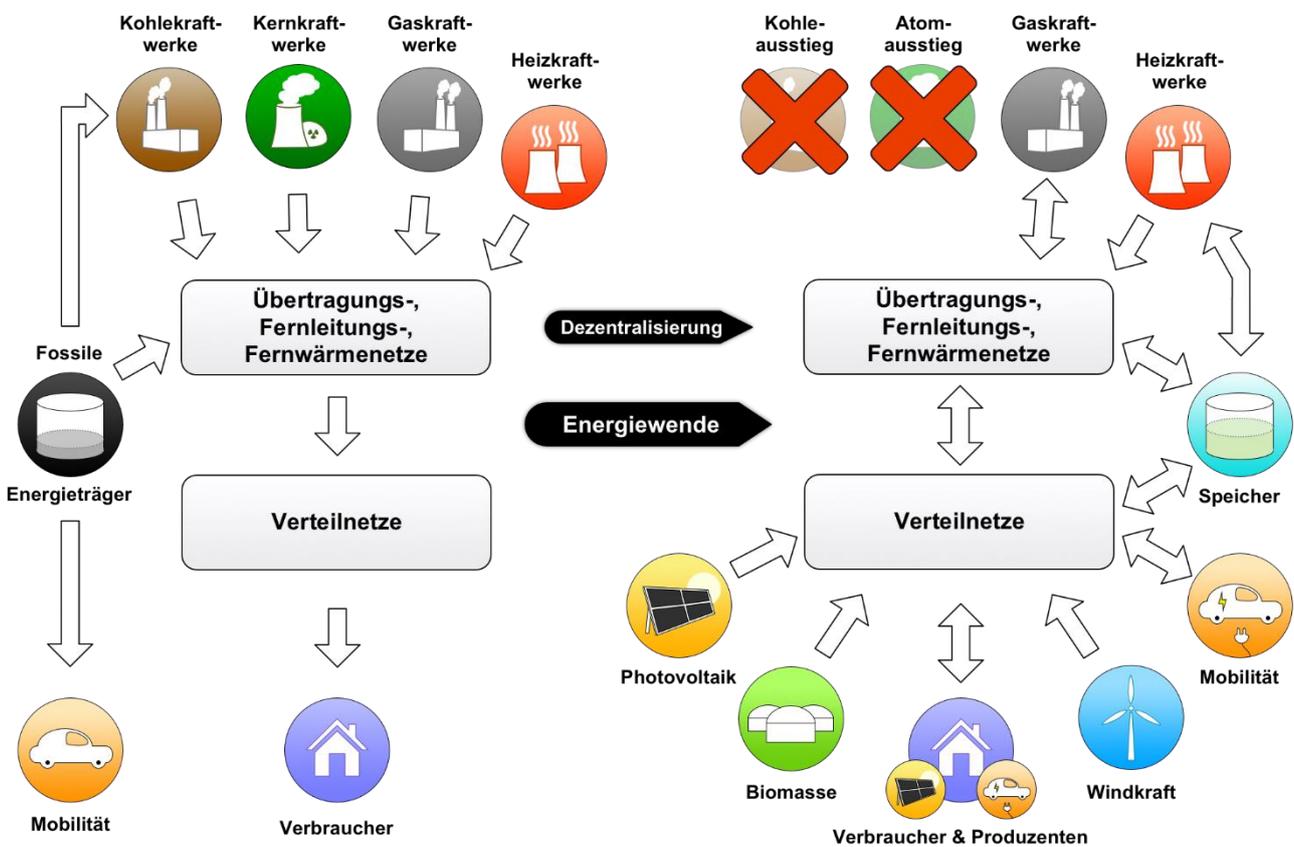
baren Energien basierendem Stromnetz müssen sie deswegen die Lastkapazitäten aufweisen, um lokale Überschüsse in der Stromerzeugung überregional an die Orte hohen Verbrauchs weiterzuleiten. Können sie dies nicht gewährleisten, muss Erzeugerleistung – zum Beispiel durch vorübergehende Abschaltung von Windkraftträdern – abgeregelt werden. Die Menge an auf Grund von Netzüberlastung abgeregelter Energie hatte sich im Netzgebiet der 50Hertz Transmission GmbH in den Jahren von 2012 bis 2015 bereits innerhalb kurzer Zeit verzehnfacht. Jedoch hat die Inbetriebnahme des zweiten Abschnitts der Südwest-Kuppelleitung Ende 2015 eine vorläufige Entspannung der Situation gebracht.^{34, 35} Jedoch reichen diese Ausbaumaßnahmen nicht aus, um bei dem schnellen Wachstum des Anteils der erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung die verlässliche und effiziente räumliche Umverteilung der erneuerbaren Energien durch das Übertragungsnetz zu sichern. Weitere Maßnahmen und die Nutzung weiterer Flexibilitätsoptionen sind deswegen notwendig.

Während durch die konventionelle Energiegewinnung aus fossilen Energieträgern, die Steuerung der Kraftwerke und die Verteilung der Lastflüsse an die Verteilernetzebene allein durch die Übertragungsnetzbetreiber erfolgte, ergeben sich durch die Energiewende ebenfalls neue Anforderungen an die Verteilernetze. Insbesondere Windkraft- und Photovoltaikanlagen werden vorrangig über das Hochspannungs- und Mittelspannungs-Verteilernetz (110-kV/20-kV-Netze) in das Stromnetz integriert, wodurch es insbesondere auf dieser Ebene zu erheblichen Rückeinspeisungen von Erzeugerleistung kommt. Durch diese Dezentralisierung der Energieeinspeisung müssen die Verteilernetzbetreiber daher künftig zunehmend auch die Steuerung der Lastflüsse übernehmen. Aktuell zeigt sich insbesondere in Nord-, Mit-

³⁴ 50Hertz-Website, <http://www.50hertz.com/de/Netzausbau/Leitungen-an-Land/Suedwest-Kuppelleitung> (Zugriff: 29.08.2018).

³⁵ Thüringer Energie AG (2017), Sturm, „Speichertechnologien aus Sicht eines Energieversorgers und Netzbetreibers“, ThEEN Fachforum „Energiespeicherung mit Sektorkopplung“, Erfurt, 13.02.2017.

Abbildung 2.4. Schema zur Veranschaulichung der strukturellen Anforderungen, die durch die Energiewende an die Energienetze entstehen. Die Pfeile zeigen die Richtung des Energie- bzw. Rohstoffflusses an. Zugleich stellt diese Abbildung damit den grundlegenden Unterschied zwischen zentralen und dezentralen Energienetzen dar.



Quelle: Eigene Darstellung (FSU Jena)

tel- und Ostthüringen eine teils grenzwertige Belastung des Verteilernetzes auf Grund von Einspeisungen aus erneuerbaren Energien.³⁵ Weiterhin ist auf Grund des 1%-Flächenzieles der Landesregierung und der Studie zur „Ermittlung von Präferenzräumen für Windenergienutzung in Thüringen“ in den nächsten Jahren mit einer verstärkten Einbindung von Windkraftanlagen in diesen Regionen zu rechnen, sofern dies nicht am Widerstand der Bevölkerung scheitert.^{36, 37} Neben der Ausbauplanung der Thüringer Energie AG,³⁸ ist auch auf der Verteilernetzebene der Einsatz weiterer Flexibilitätsoptionen nötig, um mittelfristig eine Netzüberlastung zu verhindern.

2.3.2 Anforderungen an das Wärmenetz

Der Ausbau der Nah- und Fernwärmenetze wird im Zusammenhang mit der Energiewende kontrovers diskutiert. Unstrittig ist jedoch, dass mittlerweile die Bedeutung des Wärmesektors für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende stärker in das Bewusstsein der Akteure gerückt ist, nachdem die öffentliche Diskussion über Jahre hinweg von der Energiewende im Stromsektor dominiert war.

Sowohl der weitere Ausbau von Kraft-Wärme-Kopplungs-Kraftwerken, als auch Verfahren wie Power-to-Heat aus überschüssigem erneuerbarem Strom haben

³⁶ Koalitionsvertrag zwischen den Parteien DIE LINKE, SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN für die 6. Wahlperiode des Thüringer Landtags.

³⁷ Döpel Landschaftsplanung i.A. des Thüringer Ministeriums für Infrastruktur und Landwirtschaft (2015), „Ermittlung von Präferenzräumen für Windenergienutzung in Thüringen“.

³⁸ Thüringer Energie AG (2016), Sturm, „Ausbau und Entwicklung der regionalen Energie-Infrastruktur in Thüringen“, 5. Regionale Energiekonferenz Südwestthüringen, Suhl, 09.11.2016.

großes Potential den Ausbau von Fernwärmenetzen zu befeuern. Insbesondere in der kalten Jahreszeit hat eine direkte Umwandlung überschüssigen Stroms in Wärme Vorteile hinsichtlich der Energieeffizienz zum Beispiel gegenüber der alternativen Nutzung überschüssigen Stroms zur Herstellung von synthetischem Erdgas für Heizungszwecke. Nahwärmenetze werden vor allem dann ausgebaut werden, wenn der Ausbau von dezentralen Biomasseheizkraftwerken, Solarthermieanlagen oder Geothermieanlagen durch neue Anreizmechanismen beschleunigt wird. Insbesondere zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen in der warmen Jahreszeit werden Flexibilitätsoptionen unablässig sein.

2.3.3 Anforderungen an das Gasnetz

Das langfristige Ziel der Energiewende ist eine weitestgehend CO₂-neutrale Energiewirtschaft. Dies setzt den nahezu vollständigen Verzicht auf fossile Energieträger, zu denen auch das Erdgas zählt, voraus. Gemäß dem „Klimaschutzplan 2050“ der Bundesregierung werden auf fossilem Erdgas basierende Technologien auf Grund der vergleichsweise geringen CO₂-Emissionsrate gegenüber anderen fossilen Energieträgern über die nächsten Jahrzehnte hinweg jedoch weiterhin als wichtige Übergangstechnologien angesehen. Langfristig soll fossiles Erdgas durch regenerativ erzeugtes Gas ersetzt werden. Weiterhin sollen außerdem „Neuinvestitionen in fossile Energieinfrastrukturen und daraus entstehende Lock-in-Effekte“ in Übereinstimmung mit dem Pariser Klimaschutzabkommen vermieden werden.³⁹

Daraus ist abzuleiten, dass sowohl Erdgas als auch die Erdgasinfrastruktur für die Energiewende eine tragende Rolle spielen wird. Dies gilt sowohl für fossiles Erdgas, als auch mit Hinblick auf Power-to-Gas Technologien. Für den Zeitraum bis etwa 2030 erwarten die Fernleitungsnetzbetreiber auf Basis aktueller europäischer Szenarien

(EUCO-Szenarien) und auf Grund steigender Energieeffizienz sowie der Marktumstellung von L- auf H-Gas einen deutlichen Rückgang des derzeitigen Gasbedarfes.⁴⁰ Die aktuell größten Anforderungen an das Erdgasnetz sind derzeit deswegen auf Grund der Marktraumumstellung von L- auf H-Gas zu erwarten, von denen Thüringen allerdings nicht betroffen ist.

Weitere Herausforderungen ergeben sich aus der im „Klimaschutzplan 2050“ geforderten schrittweisen Ersetzung von fossilem durch synthetisches Erdgas. Falls dies in letzter Konsequenz durch den verstärkten Ausbau von Biogasanlagen und Power-to-Gas-Technologien umgesetzt werden kann, wird langfristig die Einspeisung ins Gasnetz ebenfalls stärker dezentralisiert werden. Das wird insbesondere die Anforderungen an gut ausgebaute Verteilernetzstrukturen erhöhen. Auch der Aufwand bei der Prüfung und Sicherstellung der Gasqualität aus vielen Einzelquellen dürfte mit dieser Umstellung wachsen. Ebenso verhält es sich mit den Anforderungen an Sicherheitsvorkehrungen, da die einzelnen Biogasanlagen und Einspeisepunkte hinreichend gegen Entweichung des gewonnenen Methans abgedichtet werden müssen. Der kontrollierte Umgang mit Methan im Anlagenbetrieb muss sichergestellt sein, da Methan ein etwa 25-fach stärkeres Treibhausgas als CO₂ ist. Weiterhin ist anzumerken, dass die Fernleitungsnetzbetreiber den Einbezug von Power-to-Gas in die Netzentwicklungsplanung derzeit noch für nicht möglich halten, da die zukünftige Rolle der Gasnetze noch nicht absehbar ist.⁴¹

2.3.4 Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur

Die Hauptanforderungen an die Verkehrsinfrastruktur ergeben sich vor allem durch die Umstellung von einer auf fossilen Kraftstoffen basierenden hin zu einer auf erneuerbaren Energien basierenden Mobilität. Dazu wird insbesondere die Kraftstoffverteilung von Mineralöl-

³⁹ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016), „Klimaschutzplan 2050“.

⁴⁰ Prognos AG i.A. der FNB Gas (2017), „Entwurf des Szenariorahmens zum Netzentwicklungsplan Gas 2018-2028“, Workshop, Berlin, 29.06.2017.

⁴¹ Deutsche Energie-Agentur (2016), „Potenzialatlas Power to Gas – Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen“.

Tabelle 2.1. Beispielhafte Einsatzmöglichkeiten von Speichern in einem dezentralen Energienetz.

Sektor	Einsatzmöglichkeiten
Strom	Spannungsregelung, Frequenzhaltung, Spitzenkappung, Schwarzstartenergie, Inselnetze, Effizienzsteigerung bei Stromgewinnung
Wärme	Entkopplung von Strom- und Wärmege- winnung in KWK-Anlagen, Effizienzstei- gerung bei Wärmege- winnung, Power-to- Heat
Gas	Spitzenkappung, Langzeitspeicher (Power-to-Gas), Speicher für Erdgasauto, Effizienzsteigerung, Power-to-Gas
Verkehr	Alternative Kraftstoffe über Power-to-X, Batteriespeicher für E-Autos, E-Autobat- terien als dezentrale netzdienliche Spei- cher, Speicher für Ladestationen zur Netzentlastung

Quellen: Siehe Fußnoten³⁹⁻⁴⁸

tankstellen auf Stromladestationen oder Gastankstellen umgestellt werden müssen, was zugleich einen hohen technischen und einen hohen ökonomischen Aufwand darstellt. Unabhängig von der Technologie wird der schnelle Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur für die „Kraftstoff“-Verteilung maßgeblich für die gesellschaftliche Akzeptanz der neuen Mobilitätsart sein. Deswegen wird dieser strukturelle Wandel im besten Fall dem großräumigen Markteintritt von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen vorausgehen bzw. wenigstens mit ihm Schritt halten müssen. In Thüringen wurde Anfang 2017 hierzu die „Thüringer Ladeinfrastrukturstrategie“ vom Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN) vorgestellt. Auf Empfehlung einer von der Bauhaus-Universität Weimar und dem Fraunhofer IOSB durchgeführten Studie,⁴² die vom TMUEN in Auftrag gegeben wurde, wird in Thüringen der Bau von etwa 300 Normal- und 70 Schnellladestationen für Elektroautos bis zum Jahr 2020 mit etwa 3,4 Mio. Euro vom Bund und Freistaat gefördert. Weitere

2,6 Mio. Euro kommen dabei von Thüringer Energieversorgern.⁴³ Insbesondere durch die sich anbahnende Elektromobilität ergeben sich zusätzlich weitere Anforderungen an die Stromnetze. Diese müssen eine Vielzahl sich ständig hinzu- und abschaltender Verbraucher mit vergleichsweise hoher Momentanlast tragen können. Insbesondere wird dies im Falle einer sich durchsetzenden, flächendeckenden Elektromobilität die Netzlast in den Nachtstunden erhöhen, wenn die Photovoltaik keinen Beitrag zur Stromgewinnung leisten kann. Auch diese Diskrepanz zeigt die Notwendigkeit zur Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen.

2.3.5 Einsatzmöglichkeiten von Energiespeichern im zukünftigen Energienetz

Die zukünftigen Anforderungen an die Netze und an die Gewährleistung der Versorgungssicherheit sind vielfältig. Energiespeicher können dabei eine Palette an Flexibilitätsoptionen in den verschiedenen Sektoren bereitstellen. Diese Einsatzmöglichkeiten sollen in diesem Abschnitt kurz diskutiert werden. Tabelle 2.1 fasst die hier genannten Einsatzmöglichkeiten zusammen.

2.3.5.1 Einsatzmöglichkeiten im Stromsektor

Im Stromsektor sind die Einsatzmöglichkeiten besonders zahlreich. Insbesondere können sie einen Beitrag in vielen Bereichen der Systemdienstleistungen leisten, da sie sowohl positive als auch negative Regelleistungen (von Momentan- bis zur Minutenreserve), Blindleistungen und auch „Schwarzstartenergie“ zur Versorgungswiederaufnahme von Kraftwerken bereitstellen können. Dadurch können sie auch maßgeblich zur Auflösung der zeitlichen Diskrepanz zwischen Einspeisespitzen und Lastspitzen beitragen, die durch die nicht-steuerbare Stromgewinnung aus Windkraft und Sonnenenergie resultiert. Dies verringert auch die unnötige Belastung der

⁴² Bauhaus-Universität Weimar und Fraunhofer IOSB i.A. des Thüringer Ministeriums für Umwelt, Energie und Naturschutz (2016), „Ladeinfrastrukturstrategie für Elektrofahrzeuge des Freistaats Thüringen für die Jahre 2016-2020“.

⁴³ Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz, Presseinformation vom 13.01.2017, <https://www.thueringen.de/th8/tmuen/aktuell/presse/96068/index.aspx> (Zugriff: 29.08.2018).

Netze bzw. die Notwendigkeit zur Abregelung, die durch Stromüberproduktion hervorgerufen wird.

Insgesamt können Stromspeicher somit sämtliche netzstabilisierenden Systemdienstleistungen übernehmen, die bisher von konventionellen Kraftwerken getragen werden. Für Thüringen hat die Thüringer Energie AG auf dem Fachforum „Energiespeicherung mit Sektorkopplung“ (Erfurt, 2017) Prognosen vorgestellt, die für das Jahr 2030 bei gleichbleibendem Stromverbrauch in Thüringen eine benötigte netzdienliche Stromspeicherkapazität von schätzungsweise maximal 1 TWh (im Durchschnitt: 400 GWh) erwarten lassen („Best Case“-Szenario: Verbrauch pro Jahr und Erzeugung pro Jahr ausgeglichen).⁴⁴ Es ist zu erwarten, dass Stromspeicher wesentlicher Bestandteil eines dezentralen, auf erneuerbaren Energien beruhenden Stromnetzes sein werden. Betrachtungen zum positiven Einfluss von Speichern auf die Netzstabilität und ökonomische Untersuchungen finden sich u. a. in den Studien der Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES) der OTH Regensburg und der AGORA Energiewende gGmbH.^{45,46}

2.3.5.2 Einsatzmöglichkeiten im Wärmesektor

Eine im Jahr 2016 veröffentlichte Studie der Technischen Universität Berlin hat den „Einsatz von Wärmespeichern und Power-to-Heat-Anlagen in der Fernwärmeerzeugung“ detailliert untersucht.⁴⁷ Als positiv wurde hervorgehoben, dass Wärmespeicher insbesondere in Kombination mit KWK-Anlagen eine Entkopplung der Strom- und Wärmegewinnung ermöglichen. Insbesondere können durch Einsatz von Wärmespeichern KWK-Anlagen technisch und ökonomisch effizient in einer

stromgeführten bzw. strompreisgeführten Fahrweise eingesetzt werden, was zu einer starken Flexibilisierung im Wärmesektor beiträgt. Sowohl Wärmespeicher als auch Power-to-Heat-Anlagen können demnach entscheidend zur Effizienzsteigerung und Flexibilisierung des Wärmesektors eingesetzt werden.

2.3.5.3 Einsatzmöglichkeiten im Gassektor

Gasgroßspeicher werden auf Grund der hohen Importabhängigkeit Deutschlands derzeit vor allem zur Vorhaltung von Erdgasreserven für mögliche Importausfälle genutzt. Aber auch für die Spitzenkappung (engl. „Peak shaving“) im Gasverbrauch existieren Erdgasspeichertechnologien. Für die Energiewende stellen Sterner *et al.* heraus, dass das Gasnetz samt seinen Speichern derzeit der einzige national verfügbare saisonale bzw. Langzeitspeicher ist. Durch sektorkoppelnde Technologien wie Power-to-Gas könnte dies insbesondere für die Einspeicherung überschüssiger Energie aus dem Stromsektor ausgenutzt werden.^{48,49} Weitere Einsatzmöglichkeiten kleinerer Speicher sind vor allem im Zusammenhang mit Erdgasautos („Gastanks“) und mit dezentralen Biogasanlagen für die Optimierung der Eigenversorgung zu sehen. Ansonsten ist – sofern die Netzstruktur und Biogasqualität dies leisten kann – die direkte Ein- und Ausspeisung ins Erdgasnetz wohl der Speicherung in separaten Tanks vorzuziehen.

2.3.5.4 Einsatzmöglichkeiten im Verkehrssektor

Die bedeutendste zukünftige Anwendung von Speichertechnologien im Verkehrssektor ist wohl in alternativen Kraftstoff-Speichern für Fahrzeuge zu sehen. Dabei kön-

⁴⁴ Thüringer Energie AG (2017), Sturm, „Speichertechnologien aus Sicht eines Energieversorgers, „Netzbetreibers“, ThEEN Fachforum „Energiespeicherung mit Sektorkopplung“, Erfurt, 13.02.2017.

⁴⁵ OTH Regensburg i.A. des Bundesverbands Erneuerbare Energie e.V. (2015), „Der positive Beitrag dezentraler Batteriespeicher für eine stabile Stromversorgung“.

⁴⁶ Agora Energiewende (2014), „Stromspeicher in der Energiewende - Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz“.

⁴⁷ TU Berlin i.A. des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (2017), „Einsatz von Wärmespeichern und Power-to-Heat-Anlagen in der Fernwärmeerzeugung“.

⁴⁸ Sterner et al. (2014), „Langzeitspeicher in der Energiewende“, Speicherkonferenz des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) „Speicher im Kontext der Energiewende“, Berlin, 08.10.2014.

⁴⁹ Sterner & Stadler (2017), Energiespeicher - Bedarf, Technologie, Integration. 2. Auflage, Springer-Verlag, Deutschland.

nen prinzipiell Speichertechnologien aus dem Strom- und Gassektor genutzt werden, um Mobilität auf Basis von Strom (Elektroautos), Wasserstoff (Brennstoffzellenautos) oder Erdgas (Erdgasautos) zu gewährleisten. Während der Trend derzeit eher hin zu Elektroautos geht, weisen ebenfalls die sektorkoppelnden Verfahren wie Power-to-Gas und Power-to-Liquid Potenziale zur Versorgung des Verkehrssektors auf, falls diese in Zukunft großräumig Anwendung finden sollten. In Thüringen wird derzeit jedoch hauptsächlich der Markthochlauf der Elektromobilität gefördert.⁵⁰ Des Weiteren spricht sich insbesondere auch die Thüringer Energie AG für die Elektromobilität aus. Die „Elektrifizierung des Fuhrparks ist ein Teil der TEAG-Strategie“, in der die Batteriespeicher von Elektrofahrzeugen in ihrer Gesamtheit einen dezentralen, netzdienlichen Großspeicher für bidirektionales Laden darstellen. Das Speicherpotential von 50 Fahrzeugen wird von der TEAG auf insgesamt 0,5 bis 1 MWh geschätzt.^{51,52} Bei derzeit etwa 1,2 Millionen Kraftfahrzeugen in Thüringen⁵³ würde bei einer vollständigen Umstellung auf Elektromobilität demnach ein theoretisches elektrisches Speicherpotential von 12 bis 24 GWh bereitstehen.

In Bezug auf Ladestationen für Elektroautos können Speicher aber auch anderweitig für den Verkehrssektor genutzt werden. Zum Beispiel könnten Großspeicher in der Nähe von Ladestationen genutzt werden, um der mit einer flächendeckenden Elektromobilität einhergehende, gesteigerte Netzlast entgegenzuwirken, indem Überschussstrom aus erneuerbaren Energien permanent in Stromspeichern nahe den Ladestationen eingespeichert und für die angeschlossenen Ladestationen vorgehalten wird. Ähnliches gilt aber prinzipiell auch für

eine auf Wasserstoff oder synthetischem Erdgas basierenden Mobilität und zugehörigen Speicherarten.

2.3.6 Speicherkapazitäten in Thüringen

Zuletzt sollen in diesem Abschnitt schließlich die innerhalb dieser Studie ermittelten, bereits vorhandenen Speicherkapazitäten der verschiedenen Energiesektoren in Thüringen überblicksweise dargelegt werden. Die Tabelle 2.2 am Ende dieses Abschnitts fasst die bekannten Speicherkapazitäten zusammen.

2.3.6.1 Speicher im Stromsektor

In Thüringen existieren bereits netzdienliche Stromspeicher mit einer gesamten Leistung von 1,5 GW und einer gesamten Energiespeicherkapazität von etwa 12,1 GWh. Diese sind fast ausschließlich in Form von fünf Pumpspeicherkraftwerken realisiert. Zudem sind drei weitere in Planung und immer wieder ein Thema kontroverser öffentlicher Debatten.⁵⁴ Darüber hinaus wurden in der Potenzialanalyse „Pumpspeicherkataster Thüringen“ weitere mögliche Standorte für Pumpspeicherkraftwerke im Freistaat eruiert, deren Leistungspotenzial sich auf insgesamt 4,8 GW und deren Speicherpotenzial sich auf insgesamt 39 GWh beläuft. Unter Einbeziehung des im „Pumpspeicherkataster Thüringen“ abgeschätzten Speicherpotentials für Pumpspeicherkraftwerke im Freistaat beläuft sich die durch diese Speicherart maximal bereitstellbare Gesamtspeicherkapazität somit auf etwa 51 GWh.

Bei Batteriespeichern ist im Stromnetz der TEN Thüringer Energienetze GmbH & Co. KG darüber hinaus ein stark steigender Einsatz zu verzeichnen. Während im Jahr 2012 nur sieben angemeldete Batteriespeicher in Betrieb waren,⁵¹ belief sich die Gesamtzahl im Septem-

⁵⁰ Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz, Presseinformation vom 13.01.2017, <https://www.thueringen.de/th8/tmuen/aktuell/presse/96068/index.aspx> (Zugriff: 29.08.2018).

⁵¹ Thüringer Energie AG (2017), Sturm, „Speichertechnologien aus Sicht eines Energieversorgers und Netzbetreibers“, ThEEN Fachforum „Energiespeicherung mit Sektorkopplung“, Erfurt, 13.02.2017.

⁵² Thüringer Energie AG (2017), Schuldig, „Design elektrischer Energiespeicher für die Anwendung im industriellen Umfeld“, Weimar, 10.05.2017.

⁵³ Thüringer Landesamt für Statistik (2016), Pressemitteilung 061/2016, Erfurt, 11.03.2016.

⁵⁴ Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Technologie (2012), „Pumpspeicherkataster Thüringen – Ergebnisse einer Potentialanalyse“.

ber 2017 bereits auf 847 angemeldete Batteriespeicher von denen 610 mit einer Gesamtleistung von 2,5 MW und eine Gesamtkapazität von 3,1 MWh in Betrieb sind. Dabei weisen 95% dieser Speicher Leistungen kleiner als 10 kW auf und sind hauptsächlich im Kleingewerbe oder im häuslichen Bereich anzufinden. Dabei zielt der Speichereinsatz hauptsächlich auf die Erhöhung der Eigenversorgung ab. Allein die TEAG-Tochter KomSolar Service GmbH hat aktuell etwa 40 eigene Photovoltaik-Speicherprojekte mit einer Kapazität von insgesamt rund 250 kWh in Betrieb (sowohl im TEN-Netz, als auch in Stadtwerksnetzen). Weiterhin wird voraussichtlich im Dezember 2017 das Gemeinschaftsprojekt „Quartierspeicher Großrettbach“ zwischen der TEAG/TEN und der ads-tech GmbH mit einer Kapazität von 240 kWh in Betrieb gehen.⁵⁵ Gemessen an der verfügbaren Speicherkapazität durch Pumpspeicherkraftwerke, ist die Gesamtkapazität dieser Batteriespeicher zwar gering, jedoch zeigt der deutliche Anstieg in den letzten Jahren das stark zunehmende Interesse und damit die stark zunehmende Bedeutung an Batteriespeichern insbesondere für Industrie, Gewerbe und private Haushalte. Gemessen an der Stromspeicherkapazität aller derzeit in Betrieb befindlichen Pumpspeicherkraftwerke in Thüringen sind auf Basis des von der TEAG prognostizierten Speicherbedarfs von 1 TWh nur 1,2% der erforderlichen Stromspeicherkapazität für das thüringische Stromnetz vorhanden. Mit den abgeschätzten, ungenutzten Speicherpotenzialen, beläuft sich der Wert auf 5,1%.

2.3.6.2 Speicher im Wärmesektor

In Thüringen existieren gemäß einer Studie der Technischen Universität Berlin (2017) zwei Großspeicher für Fernwärme. Diese befinden sich in den Fernwärmenet-

zen der Städte Jena (Volumen: 13.000 m³, Speicherkapazität: ca. 480 MWh⁵⁶) und Erfurt (Volumen: 7.500 m³, Speicherkapazität: 250 MWh).⁵⁷ Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass eine Vielzahl kleinerer Wärmespeicher in der Industrie, privaten Haushalten und im Handel-/Gewerbebereich zu finden sind. Da diese aber weder meldepflichtig sind, noch Erhebungen darüber gefunden wurden, kann über die installierte Gesamtspeicherkapazität keine Aussage getroffen werden.

2.3.6.3 Speicher im Gassektor

In Bezug auf bestehende Untergrund-Gasspeicher besitzt Deutschland mit seinen 51 Poren- bzw. Kavernenspeichern, welche etwa 24,1 Mrd. Nm³ an maximalem Arbeitsgasvolumen aufnehmen können, das größte Speichervorkommen in Europa und das viertgrößte Speichervolumen auf der Welt.⁵⁸ Davon entfällt auf Thüringen mit seinen Porenspeichern Allmenhausen (62 Millionen Nm³) und Kirchenheiligen (190 Millionen Nm³) ein maximal nutzbares Arbeitsgasvolumen von 252 Millionen Nm³. Bei einer konservativen Schätzung mit einem durchschnittlichen Heizwert von etwa 9,77 kWh je m³ Erdgas entspricht das einer Gesamtenergiemenge von etwa 2,46 TWh, die zusammen in den beiden Untergrundspeichern in Thüringen gespeichert werden können. Hinzu kommt die Gasmenge, welche stetig die insgesamt mehr als 12.000 km langen Rohrleitungen des thüringischen Erdgasnetzes durchströmt.⁵⁹

Für Deutschland insgesamt ergibt sich bei ähnlicher Rechnung eine Speicherkapazität von über 200 TWh.⁶⁰ Diese Kapazitäten sind für die Energiewende insbesondere in Hinblick auf Power-to-Gas-Technologien interessant, welche mit einem Wirkungsgrad von 60% (Standardanlagen) bis 75% (HELMETH Demoprojekt) über-

⁵⁵ Daten entstammen der Antwort auf eine im Rahmen dieser Studie gestellten Anfrage an die Thüringer Energie AG (Stand: 15.09.2017).

⁵⁶ Speicherkapazität dieses Fernwärmespeichers wurde aus dem Volumen und einer durchschnittlicher Energiedichte von 37 kWh je m³ abgeschätzt.

⁵⁷ TU Berlin i.A. des BMWi (2017), „Einsatz von Wärmespeichern und Power-to-Heat-Anlagen in der Fernwärmeerzeugung“.

⁵⁸ Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2017), „Untertage-Gasspeicherung in Deutschland“, ERDÖL ERDGAS KOHLE 132. Jg. 2016, Heft 11.

⁵⁹ BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2009), Netzkennzahlen der Bundesländer.

⁶⁰ Fraunhofer-Gesellschaft, <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2010/04/strom-erdgas-speicher.html> (Zugriff: 29.08.2018).

schüssigen Strom aus erneuerbaren Energien zur Herstellung synthetischen Erdgases verwenden können.⁶¹

2.3.6.4 Speicher im Verkehrssektor

Thüringen selbst hat keine nennenswerten Mineralölspeicher oder andere Speicher für den Verkehrssektor. Die Mineralölspeicherung ist in Deutschland gesetzlich geregelt und wird vom Erdölbevorratungsverband in Hamburg übernommen. Dieser hält gemäß Erdölbevorratungsgesetz (ErdölBevG) genug Reserven für eine 90-tägige Versorgung der Bundesrepublik vor. Weiterhin sind 731 Elektroautos in Thüringen gemeldet (bundesweit: 53.861),⁶² die bei einer Batteriespeicherkapazität von 10 bis 20 kWh theoretisch 7 bis 14 MWh an Speicherkapazität besitzen.⁶³ Gemessen an der absoluten Anzahl von Elektrofahrzeugen liegt der Freistaat damit auf Platz 12 im bundesweiten Vergleich.

2.4 Das Förderprogramm „Solar Invest“

Das Förderprogramm „Solar Invest“, das vom Freistaat Thüringen Ende 2016 ins Leben gerufen wurde, ist als politische und rechtliche Rahmenbedingung ebenfalls von großer Bedeutung. Mit dem Förderprogramm reagiert das Bundesland auf die durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2017 geänderten Rahmenbedingungen. Das Förderprogramm soll neue Impulse für den Klimaschutz und die Nutzung der Sonnenenergie in Thüringen geben. Dadurch werden wichtige lokale Akteure der Energiewende wie Kommunen und kommunale Unternehmen, die Thüringer Wohnungswirtschaft, kleine und mittelständische Unternehmen sowie Bürgerenergiegenossenschaften unterstützt. Durch Mieterstrommodelle können erstmals auch Mieterinnen und Mieter von den Kostenvorteilen erneuerbarer Energien profitie-

ren. Mit bis zu 25 %⁶⁴ der Gesamtkosten werden mit „Solar Invest“ Neuinvestitionen in Photovoltaikanlagen gefördert. Voraussetzung ist, dass der erzeugte Strom der Eigen- oder Direktversorgung dient und nicht in ein öffentliches Netz eingeleitet wird. Mit dem gleichen Fördersatz sind Neuinvestitionen, Ersatzinvestitionen in oder die Erweiterung von Stromspeichern und Wärmespeichern (Warmwasser-, Kältespeicher, Power-to-Heat-Anlagen) förderfähig. Investitionen in vorhandene Photovoltaikanlagen mit stationären Energiespeichersystemen, die der Speicherung von Strom aus Photovoltaik dienen, werden ebenfalls mit bis zu 25 % gefördert. Die Antragstellung erfolgt über die Thüringer Aufbaubank. Der maximal mögliche Zuschuss je Vorhaben beträgt 100.000 Euro.⁶⁵

⁶¹ Karlsruher Institut für Technologie, Presseinformation (Nr. 009) vom 05.02.2018, www.helmeth.eu (Zugriff: 29.08.2018).

⁶² Kraftfahrt-Bundesamt (2018), „Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken“ (Stand: 01.01.2018).

⁶³ Thüringer Energie AG (2017), Schuldig, „Design elektrischer Energiespeicher für die Anwendung im industriellen Umfeld“, Weimar, 10.05.2017.

⁶⁴ Für Bürgerenergiegenossenschaften: bis zu 40 % für die PV-Anlage und bis zu 50 % für PV-Anlage samt Speicher.

⁶⁵ Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (2017), <http://www.thueringen.de/th8/tmuen/energie/erneuerbare/solarinvest/index.aspx> (Zugriff: 29.08.2018).

Tabelle 2.2. Übersicht bekannter Speicherkapazitäten in Thüringen mit Leistungs- und Speicherkapazitätswerten. Einige Speicherkapazitäten wurden aus durchschnittlichen Brennwerten bzw. durchschnittlichen Speicherkapazitäten für abgeschätzt, falls keine konkreten Werte gefunden wurden.

Speicherart	Standort	Leistung	Kapazität	Anmerkung
Stromsektor				
Pumpspeicher	Bleiloch	80 MW	753 MWh	-
Pumpspeicher	Wisenta	3,3 MW	0 MWh	Talsperre mit Unterbecken (keine Pumpen vorhanden)
Pumpspeicher	Hohenwarte I	63 MW	795 MWh	-
Pumpspeicher	Hohenwarte II	320 MW	2087 MWh	-
Pumpspeicher	Goldisthal	1060 MW	8480 MWh	-
Pumpspeicher	Ellrich	640 MW	3840 MWh	In Planung
Pumpspeicher	Hainleite	500 MW	3000 MWh	In Planung
Pumpspeicher	Schmalwasser	1000 MW	n. b.	In Planung
Batterien	landesweit verteilt	2,5 MW	3,1 MWh	Batterien im Netz der ThEEN (davon 95% kleiner 10 kWh)
Großbatterie, Quartierspeicher	Großrettbach	n.b.	240 kWh	Inbetriebnahme für Dezember 2017 geplant
Gassektor				
Porenspeicher	Allmenhausen	n.b.	ca. 0,61 TWh	Arbeitsgasvolumen: 62 Mio. Nm ³ ; Abschätzung mit 9,77 kWh je m ³
Porenspeicher	Kirchenheiligen	n.b.	ca. 1,86 TWh	Arbeitsgasvolumen: 190 Mio. Nm ³ ; Abschätzung mit 9,77 kWh je m ³
Wärmesektor				
Sensibler Wärmespeicher	Jena	n.b.	ca. 480 MWh	Volumen: 13.000 m ³ ; Abschätzung mit 37 kWh je m ³
Sensibler Wärmespeicher	Erfurt	n.b.	250 MWh	-
Verkehrssektor				
Fahrzeuga-batterien	landesweit verteilt	n.b.	ca. 7 - 14 MWh	731 angemeldete Elektroautos; Abschätzung: 10 – 20 kWh je Fahrzeug

Quellen: Siehe Fußnoten^{51, 55-65}

3 Energiespeichertechnologien

Das übergeordnete Ziel der Speicherung von Energie wird durch die unterschiedlichen Energiespeichertechnologien in Abhängigkeit vom Zielenergiesektor bzw. dem Anwendungsgebiet und unter Ausnutzung verschiedener technologischer Möglichkeiten und physikalischer Prinzipien angestrebt. Dennoch sind allen Lösungsansätzen eine Reihe von technischen und physikalischen Parametern gemein, die sich konsequenterweise in der Vergangenheit als Vergleichsgrundlage zur Bewertung der Leistungs- und Wirtschaftlichkeitsmerkmale dieser Technologien in der Energiespeicherbranche etabliert haben.

Die zugehörigen Begrifflichkeiten, wie sie auch in dieser Studie verwendet werden, sollen in diesem Kapitel kurz dargelegt werden. Im Anschluss wird auf die wichtigsten und technologisch fortgeschrittensten Energiespeichertechnologien vergleichend eingegangen, sowie einige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Freistaat genannt.

3.1 Physikalische Begriffe

Energie (SI-Einheit: Joule [1 J]) ist die Fähigkeit Arbeit im physikalischen Sinne zu verrichten. Dies kann in Form von Wärmeaustausch, mechanischer Arbeit, durch Aussendung von Licht, durch Umwandlung von Stoffen oder in Form elektrischer oder magnetischer Arbeit geschehen. Energie kann nicht vernichtet und nicht erzeugt werden, sondern lediglich von einer in eine andere Energieform umgewandelt werden. Die Umwandlung einer Energieform in eine andere ist für die Energiespeicherung ebenfalls von maßgeblicher Bedeutung. Für unsere Gesellschaft hat dabei die elektrische Energie eine herausragende Bedeutung, da sie die Energieform ist, die prinzipiell am leichtesten in alle anderen Energieformen umgewandelt werden kann. Demgegenüber steht thermische Energie (Wärme) am anderen Ende der Kette, da

prinzipiell alle Prozesse die in ihnen gespeicherte Energie schlussendlich in Form von Wärme freisetzen.

Leistung (SI-Einheit: Watt [1 W]) beschreibt die pro Zeiteinheit umgewandelte oder übertragene Energiemenge bzw. die pro Zeiteinheit verrichtete Menge an Arbeit im zuvor genannten Sinne.

Dies sind die beiden zentralen physikalischen Begriffe der Energiebranche, deren Definition sich in ähnlicher Weise in jedem Grundlagenlehrbuch der Physik wiederfinden. Eine Reihe technischer Parameter und Begrifflichkeiten zur Charakterisierung von Energiespeichern stützen sich in natürlicher Weise auf diese beiden Begriffe, wie im folgenden Abschnitt beschrieben.

3.2 Technische Begriffe

Die **Energiespeicherkapazität** bezeichnet die Energiemenge, die ein Energiespeicher grundsätzlich maximal einspeichern und ausspeichern kann. Im Gegensatz zur physikalischen Größe Energie, wird die Energiespeicherkapazität aus praktischen Gründen meist in Wattstunden (Wh) angegeben, wobei gilt $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$. Durch Alterungseffekte kann sich die Energiespeicherkapazität bei manchen Speichertechnologien mit zunehmender Betriebsdauer verringern.

Die **Ein- oder Ausspeicherleistung** bezeichnet die Energiemenge, die ein Energiespeicher pro Zeiteinheit einspeichern oder ausspeichern kann. Sie ist das direkte technische Äquivalent der zuvor definierten physikalischen Leistung und wird ebenfalls in Watt (W) gemessen.

Die **Energiedichte und spezifische Energie** sind die auf das Gesamtvolumen (Energiedichte, Wh m^{-3}) oder die Gesamtmasse (spezifische Energie, Wh kg^{-1}) des Energiespeichers bezogene Energiespeicherkapazität. Die **Leistungsdichte und spezifische Leistung** sind die auf das Gesamtvolumen (Leistungsdichte, W m^{-3}) oder die

Tabelle 3.1. Technische Parameter für die Bewertung und den Vergleich verschiedener Speichertechnologien.

Kategorie	Parameter	Einheit	Definition
Energetische Qualität	(Energie)speicherkapazität	J, Wh	Die gesamte, nutzbare Energiemenge, die vom Speicher aufgenommen und abgegeben werden kann.
	Energiedichte, spezifische Energie	Wh/m ³ , Wh/kg	Verhältnis der Energiespeicherkapazität zum Volumen bzw. zur Masse des Energiespeichers.
	Ein-/Auspeicherleistung	W	Die elektrische Leistung des Energiespeichers während des Lade-/Entladevorgangs.
	Leistungsdichte, spezifische Leistung	W/m ³ , W/kg	Verhältnis der Ein-/Auspeicherleistung zum Volumen oder zur Masse des Energiespeichers.
	Entladetiefe	%	Die Entladetiefe (engl. „depth of discharge“ (DOD)) bezeichnet die Menge an ausgespeicherter Energie im Vergleich zur gesamten Speicherkapazität
	Wirkungsgrad	%	Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis der ausgespeicherten zur eingespeicherten Energiemenge
	Betriebstemperatur	°C, K	Temperaturbereich, in dem der Speicher arbeitet
Lebensdauer	Kalendarische Lebensdauer	h, a	Maximale Betriebsdauer des Speichers in Zeiteinheiten
	Zykluslebensdauer	1	Anzahl von Lade-/Entladezyklen, während der die momentane Speicherkapazität $\geq 80\%$ der anfänglich nutzbaren Speicherkapazität
Sicherheit	Betriebssicherheit	Qualitativ	Gefahren, die vom Betrieb eines Speichers ausgehen
Umweltverträglichkeit	Umweltverträglichkeit bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung	Qualitativ	Eventueller Schaden für die Umwelt und Verbrauch natürlicher Ressourcen

Quellen: BTU Cottbus (2011), EuPD Research (2013), FSU Jena (2017)

Gesamtmasse (spezifische Leistung, $W\ kg^{-1}$) des Energiespeichers bezogenen Ein- oder Auspeicherleistungen. Besonders hohe Bedeutung haben Energie- und Leistungsdichte bzw. spezifische Energie und spezifische Leistung im Verkehrssektor und mobile Anwendungen im Allgemeinen. Aber auch in den anderen Sektoren stellen sie ein wichtiges Leistungsmerkmal aller Energiespeichertechnologien dar.

Der **Wirkungsgrad** eines Energiespeichers wird als das Verhältnis zwischen ausgespeicherter und eingespeicherter Energie üblicherweise in Prozent (%) angegeben

und fasst sämtliche Energieverluste, die durch die jeweilige Speichertechnologie verursacht werden, in einem Wert zusammen.

Der **Ladegrad**, auch **Ladezustand (State of Charge, SOC)** beschreibt die im Energiespeicher eingespeicherte Energiemenge im Verhältnis zur gesamten Energiespeicherkapazität des Speichers.

Der zum Ladegrad komplementäre Begriff **Entladegrad**, auch **Entladetiefe (Depth of Discharge, DOD)** bezeichnet entsprechend die aus dem Energiespeicher ausgespeicherte Energiemenge im Verhältnis zur Energiespei-

Tabelle 3.2. Definition der einzelnen Stufen des *Technology Readiness Level* (TRL).

TRL	Beschreibung
1	Grundprinzipien beobachtet
2	Technologiekonzept formuliert
3	Experimenteller Nachweis des Konzepts
4	Technologie im Labor überprüft
5	Technologie in relevanter Umgebung überprüft
6	Technologie in relevanter Umgebung getestet
7	Test eines System-Prototyps im realen Einsatz
8	System ist komplett und qualifiziert
9	System funktioniert in operationeller Umgebung

Quelle: BMWi⁶⁶

cherkapazität und wird wie der Ladegrad in Prozent (%) gemessen. Dabei ist zu beachten, dass bei manchen Energiespeichern (z. B. Batterien) aus technologischen Gründen nicht immer die gesamte theoretische Energiespeicherkapazität abgerufen werden kann. Damit fällt die effektiv nutzbare Energie des Speichers geringer aus und es ist zu prüfen, welchem der beiden Werte in solch einem Fall die 100% DOD entsprechen.

Die **Selbstentladungsrate** eines Energiespeichers beschreibt die Menge an Energie, die pro Zeiteinheit durch unvermeidbare, interne physikalische Prozesse im Energiespeicher für die weitere Anwendung verlorengeht. Sie wird gemessen als Energiemenge je Zeiteinheit (Wh h^{-1}). Durch diese Prozesse wird über die Zeit der Ladegrad des Energiespeichers verringert, weswegen man überhaupt von Selbstentladung spricht.

Die **Zykluslebensdauer** beschreibt die maximale Anzahl an Zyklen (eine vollständige Auf- und Entladung), über die ein Energiespeicher bei gleichzeitiger Gewährleistung eines Mindestanteils seiner anfänglichen Energie-

speicherkapazität (meist 80%) betrieben werden kann. Ergänzend dazu beschreibt die **Kalendarische Lebensdauer** die Anzahl der Jahre, die eine Speichertechnologie maximal betrieben werden kann. Tabelle 3.1 gibt nochmal einen Überblick der wichtigen Parameter und deren Kurzdefinition.

Weiterhin wird zur Bewertung und zum Vergleich von einzelnen Technologien der sogenannte **Technology Readiness Level (TRL)** verwendet. Der TRL beschreibt die Entwicklungsstufe einer Technologie, eines Verfahrens oder einer Dienstleistung und wird in der zweiten und dritten Säule vom EU-Förderprogramm „Horizon 2020“ als Messlatte für die Einstufung einer Produktentwicklung angewendet. Mit der neunstufigen TRL-Skala lässt sich also die Marktnähe beurteilen. Stufe 1 bis 6 beschäftigt sich mit den Schritten der „Vor-Wettbewerbsfähigkeit“. Ab Stufe 7 spricht man von marktnahen Produktentwicklung. Die in Tabelle 3.2 abgebildete Skala erläutert die TRL-Stufen kurz.⁶⁶

3.3 Anforderungen und Klassifizierungen

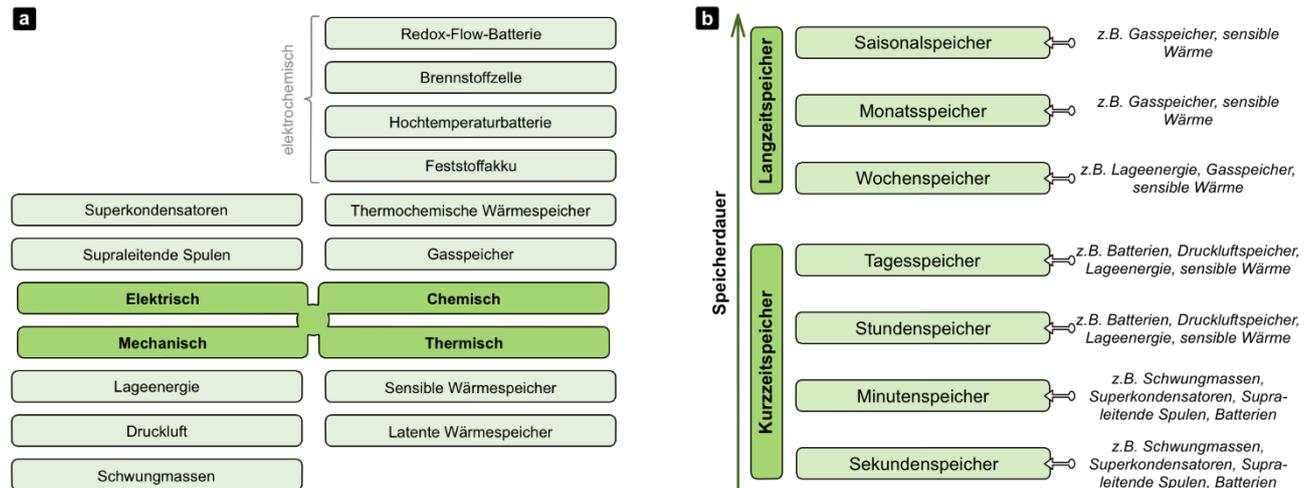
Neben der Anforderung der Klima- und Umweltverträglichkeit, gibt es grundsätzlich vielfältige technische und ökonomische Anforderungen an die Energiespeichertechnologien für die verschiedenen Sektoren und für die verschiedenen Anwendungen. Insbesondere in Hinblick auf mobile und stationäre Einsatzgebiete ergeben sich starke Unterschiede in den technischen Anforderungen. Neben der Unterteilung in Speicher für mobile und für stationäre Anwendungen lassen sich Energiespeicher ebenfalls auf unterschiedliche Weisen klassifizieren. In diesem Abschnitt sollen die Anforderungen an stationäre und mobile Anwendungen kurz beleuchtet werden.

3.3.1 Anforderungen für stationäre Anwendungen

Für stationäre Einsatzgebiete sind die technischen Anforderungen an Energiespeichertechnologien im Ver-

⁶⁶ Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (2017), <http://www.nks-kmu.de/teilnahme-trl.php> (Zugriff: 29.08.2018).

Abbildung 3.1. Klassifizierungsmöglichkeiten für Energiespeicher. Links ist die Einteilung gemäß Energieform, in der die Energie im Speicher vorliegt. Rechts ist die Einteilung gemäß möglicher Speicherdauern dargestellt.



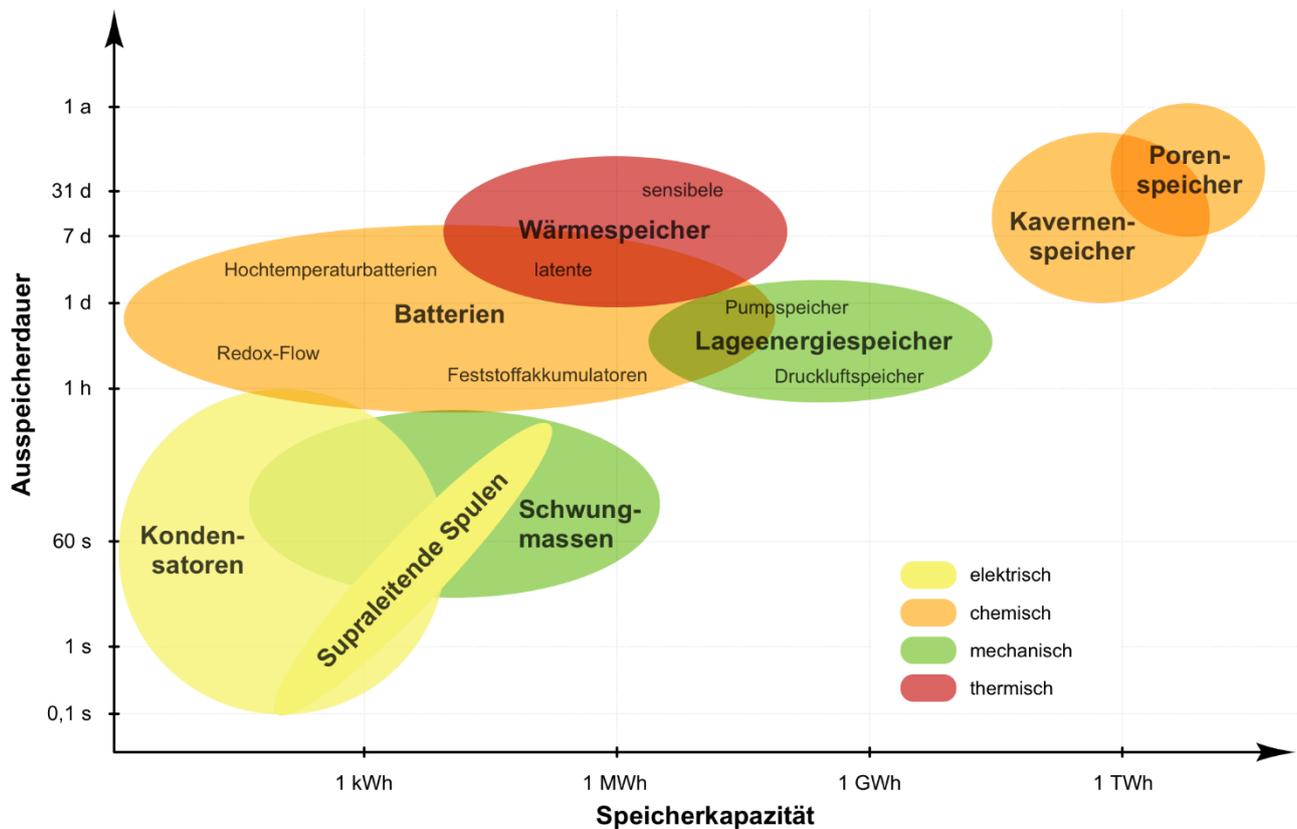
Quelle: Eigene Darstellung (FSU Jena)

gleich zu mobilen Anwendungen moderat. Platz und Gewicht sind nicht zu vernachlässigen, aber spielen eine vergleichsweise untergeordnete Rolle. Es sind hier vor allem ökonomische Erwägungen, welche die Rahmenbedingungen für die technischen Anforderungen setzen. Da stationäre Anwendungen im Bereich erneuerbarer Energien vor allem in Hinblick auf Großspeicher für Wind- und Sonnenenergie hohe Kapazitäten fordern, sind Einzelprojekte tendenziell mit hohen Kosten verbunden. Deswegen müssen Technologien in diesem Bereich kostengünstig und flexibel skalierbar sein, um auf die jeweilige Einsatzsituation optimal angepasst werden zu können. Die kalendarische Lebensdauer ist aus kostentechnischer Sicht insbesondere mit Hinblick auf die hohen Installationskosten für Großspeicher generell von hoher Bedeutung. Ein stationäres System muss viele Jahre seine Funktion gewährleisten, um sich zu amortisieren. Je nach Anwendungsgebiet, ist die Zyklenlebensdauer dahingegen von unterschiedlich großer Bedeutung. So sind bspw. im Bereich der Systemdienstleistungen für das Stromnetz höhere Zyklenlebensdauern gefordert, als für einen Langzeitstromspeicher, der im Schnitt einmal pro Tag ge- und entladen wird.

3.3.2 Anforderungen für mobile Anwendungen

Mobile Anwendungen stellen besonders hohe Anforderungen an die technischen und wirtschaftlichen Parameter von Energiespeichern. Da für die Mobilität sowohl Gewicht, als auch Platz wichtige und limitierende Ressourcen sind, müssen Energiespeicher in diesem Bereich möglichst kompakt und leicht sein. Gleichzeitig müssen jedoch hohe Speicherkapazitäten und hohe Leistungen für realistische Einsatzszenarien vorhanden sein. Es sind daher sowohl hohe Energie- und Leistungsdichten als auch hohe spezifische Energien und Leistungen gefordert. Mit den hohen, benötigten Leistungsdichten geht zudem eine erhebliche Wärmeentwicklung einher. Die entstehende Wärme muss wiederum durch kompakte und leichte Kühlsysteme effizient abgeführt werden oder der Speicher bei den zu erwartenden Temperaturen durch anderweitige Sicherheitsvorkehrungen Brand- und Explosionssicherheit gewährleisten. Darüber hinaus muss durch den täglichen Gebrauch in mobilen Anwendungen der Speicher eine besonders hohe Zyklenlebensdauer aufweisen. Überdies müssen diese hohen technischen Anforderungen außerdem zu wirtschaftlich tragbaren Kosten erfüllt werden.

Abbildung 3.2. Einordnung der verschiedenen Speichertechnologien nach realisierbaren Speicherkapazitäten und Ausspeicherdauern (Ragone-Plot).



Quelle: Eigene Darstellung nach Sterner et al. (2017)⁶⁸

3.3.3 Klassifizierungen von Energiespeichern

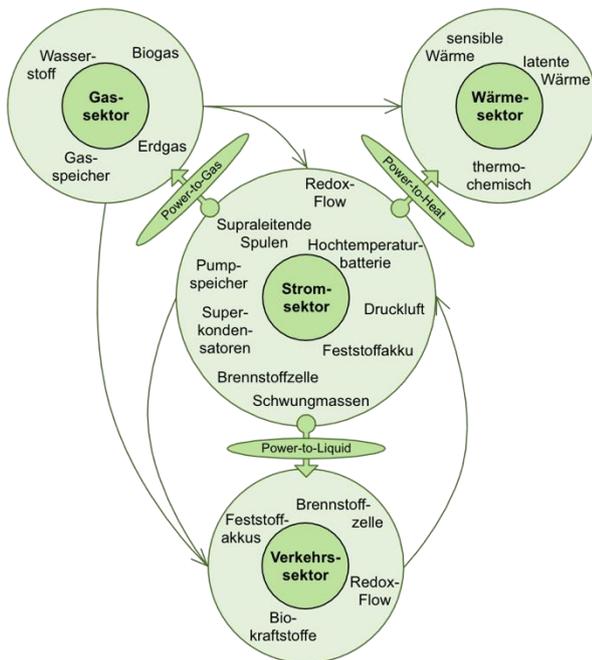
Energiespeichertechnologien lassen sich auf verschiedene Weisen klassifizieren. Die naheliegendste ist zunächst die Einteilung nach der Energieform, als welche die zugeführte Energie gespeichert wird. Diese Klassifizierung ist in Abbildung 3.1a dargestellt. Eine weitere Klassifizierung ergibt sich aus den Speicherdauern, für die sich die jeweilige Energiespeichertechnologie eignet. Diese ist überblicksweise in Abbildung 3.1b gezeigt. Mit Hinblick auf die Anwendung ist außerdem von Bedeutung, welche Kapazitäten ein Speicher aufnehmen kann und wie schnell die Energie ausgespeichert werden kann. Einen Überblick hierüber gibt Abbildung 3.2. Insbesondere aus den beiden letztgenannten Abbildungen wird deutlich, dass keine einzelne Technologie das gesamte Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten abdecken kann. In ihrer Gesamtheit jedoch, können die existierenden

Speicherarten die benötigten Anwendungsfälle bedienen. Eine für die Sektorkopplung interessante Einteilung soll das Schema in Abbildung 3.3 vermitteln, in der die Technologien gemäß ihren Verwendungsmöglichkeiten in den Energiesektoren gezeigt sind.

3.4 Speichertechnologien im Überblick

In diesem Abschnitt soll ein komprimierter Überblick über den technischen Hintergrund der aktuell vielversprechendsten Energiespeichertechnologien gegeben werden. Die Technologien sind hier entsprechend Abbildung 3.1a klassifiziert aufgeführt. Dabei werden die technischen Grundlagen in aller Kürze beschrieben und wichtige Einsatzmöglichkeiten genannt. Des Weiteren werden wichtige aktuelle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Thüringen erfasst. Letztere wurden im gegebenen Projektrahmen so sorgfältig wie möglich

Abbildung 3.3. Klassifizierung der Energiespeichertechnologien nach Verortung in den Energiesektoren. Weiterhin sind die Umwandlungs- (Pfeile) und Kopplungsmöglichkeiten der Sektoren (Power-to-X) dargestellt.



Quelle: Eigene Darstellung (FSU Jena)

recherchiert. Allerdings kann kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden, da zum einen die hohe Anzahl kleiner und mittelständischer Unternehmen in Thüringen eine Erfassung aller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Freistaat erschwert. Zum anderen gewähren leider nicht alle öffentlichen Förderprojekträger einen Einblick in ihre Projektdatenbanken.

Für weiterführende, allgemeine Informationen zu den einzelnen Speichertechnologien wird zudem auf die aktuelle Literatur verwiesen.^{67, 68}

3.4.1 Mechanische Energiespeicher

Diese Art der Energiespeicher speichern die zugeführte Energie in Form mechanischer Energie, d. h. Lageenergie (potentielle Energie) oder Bewegungsenergie (kinetische Energie).

3.4.1.1 Lageenergiespeicher

Lageenergiespeicher nutzen die Energiedifferenz, die sich beim Anheben/Absenken eines Objektes zwischen zwei verschiedenen Höhenniveaus ergibt. Dementsprechend besteht ein solcher Energiespeicher aus wenigstens zwei von einem Objekt hoher Masse erreichbaren Höhenniveaus, einer Vorrichtung zum kontrollierten Anheben und Absenken des Objektes und einem Generator, der beim Absenken des Objektes angetrieben wird, um elektrische Energie zu gewinnen. Je größer die Masse des Objektes und je größer der Höhenunterschied zwischen den Höhenniveaus, desto mehr Energie kann ein- und ausgespeichert werden. Überschüssige elektrische Energie kann in einem Lageenergiespeicher genutzt werden, um das Objekt mechanisch vom unteren auf das obere Höhenniveau anzuheben und dadurch Energie im System einzuspeichern. Für die Dauer der Speicherung wird das Objekt auf dem oberen Höhenniveau fixiert. Die Schwerkraft der Erde ist bestrebt, dieses Objekt wieder abzusenken. Für die Ausspeicherung wird die Fixierung gelöst und die durch das Absenken freiwerdende Energie wird zum Antreiben eines Generators genutzt. Dieser wandelt die mechanische Energie in elektrische Energie (Strom) um. Während eine Vielzahl von Ansätzen zur Realisierung dieser Speicherart existieren, sind die bekanntesten Lageenergiespeicher die sogenannten **Pumpspeicherkraftwerke**. Diese sind zugleich auch bislang die einzigen großtechnischen Lageenergiespeicher, die wirtschaftlich errichtet und betrieben werden können. Das oben beschriebene „Objekt großer Masse“ ist bei Pumpspeicherkraftwerken Wasser, welches mittels Pumpen auf ein oberes Höhenniveau befördert wird. In Zeiten überschüssiger Stromgewinnung werden vom Betreiber günstig Strommengen erworben und damit das Wasser aus einem unteren Wasserreservoir in ein oberes Wasserreservoir hinaufgepumpt. In

⁶⁷ SEFEP (2012), „Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität“.

⁶⁸ Sterner (2017), „Energiespeicher - Bedarf, Technologie, Integration“. 2. Auflage, Springer-Verlag, Deutschland.

Zeiten von niedrigem Stromangebot und hoher Nachfrage wird das Wasser dann wieder in das untere Becken abgelassen und treibt einen Generator an. Der so gewonnene Strom wird zu einem höheren Preis in das Netz eingespeist, als zu dem er eingekauft wurde. Dabei spielen Höhendifferenzen und eine möglichst geringe horizontale Entfernung eine wesentliche Rolle bei der Standortwahl, um die Fallhöhe möglichst groß zu gestalten.⁶⁹

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: Pumpspeicherkraftwerke sind eine seit vielen Jahrzehnten etablierte Technologie. Erforschung findet in Thüringen nur im Rahmen von Standortsuchen und Potentialstudien statt. Unkonventionelle Arten von Pumpspeichertechnologien (z. B. Untergrundpumpspeicherkraftwerke, Kugelpumpspeicherkraftwerke) werden jedoch nur außerhalb Thüringens untersucht.^{70,71}

3.4.1.2 Druckluftspeicher

In Druckluftspeichern wird elektrische Energie als mechanische Energie durch die Komprimierung von Luft mittels künstlicher Verdichtung und Kühlung gespeichert. Beim Ausspeichern wird die sich ausdehnende Luft von außen erwärmt und durch Turbinen geleitet, die über einen Generator Strom gewinnen. Als Druckbehälter sind große unterirdische Salzkavernen oder Porenspeicher geeignet. Man unterscheidet **Diabatische Druckluftspeicher** und **Adiabatische Druckluftspeicher**. Während bei diabatischen Druckluftspeichern die beim Einspeichern freiwerdende Wärme ungenutzt abgeleitet wird, wird sie beim adiabatischen Druckluftspeicher zwischengespeichert und später wieder zur Erwärmung der Luft beim Ausspeichern verwendet. Letzteres bringt entscheidende Vorteile: Zum einen wird der Wirkungsgrad gesteigert und zum anderen muss bei effizienter Wärmespeicherung keine zusätzliche Wärmequelle im System vorhanden sein, die u. U. CO₂ freisetzt.⁷²

mespeicherung keine zusätzliche Wärmequelle im System vorhanden sein, die u. U. CO₂ freisetzt.⁷²

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: Aktuell sind hierzu keine Forschungs- und Entwicklungsprojekte in Thüringen bekannt. Zuletzt waren im Jahr 2007 die K-UTEC AG Salt Technologies in Sondershausen durch ihre Beteiligung am Projekt „Druckluftspeicher zur Energiespeicherung in stillgelegten Salzbergwerken und Stabilisierung der Grubenhohlräume“ und von 2009 bis 2017 das Fraunhofer IOSB-AST mit Beteiligung an den Projekten „ADELE“ bzw. „ADELE-ING“ in dem Feld aktiv.

3.4.1.3 Schwungmassenspeicher

Das Arbeitsprinzip von Schwungmassenspeichern (auch: Schwungradspeicher) beruht darauf, dass eine Schwungmasse (Schwungrad) durch einen Motor in Rotation versetzt wird. Bei einem elektrisch betriebenen Motor wird entsprechend elektrische Energie in Form von Rotationsenergie der Schwungmasse gespeichert. Im Behältnis, in dem sich die Masse dreht, wird zumeist ein Vakuum generiert, damit die Reibungsverluste durch die Luft möglichst geringgehalten werden. Zudem wird die Masse auf ihrer Drehachse möglichst reibungsarm gelagert. Eine kontaktfreie und deswegen reibungslose Lagerung kann durch ein Magnetlager erreicht werden. Dies ist technisch jedoch die aufwendigste und auch kostenintensivste Methode. Die Energie des Schwungmassenspeichers ist so lange abrufbar, wie sich die Masse dreht. Um die Energie wieder auszuspeichern wird die Trägheit der Schwungmasse zum Antrieb eines Generators genutzt, der die Rotationsenergie wieder in elektrische Energie umwandelt und dabei die Schwungmasse kontinuierlich abbremst.⁷³ Schwungmassenspeicher zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie Energie mit

⁶⁹ Strölin (2012), https://www.politaktiv.org/web/rt_pumpspeicher_pfullingen/neues/-/asset_publisher/zWh6/bookmark/id/54101

⁷⁰ Uni-Bochum (2017), <http://www.lee.ruhr-uni-bochum.de/webseitecs5/forschung/Laufende%20Arbeiten.htm> (Zugriff: 29.08.2018)

⁷¹ Fraunhofer IEE (2017), <https://www.iee.fraunhofer.de/de/projekte/suche/laufende/stensea-storing-energy-at-sea.html> (Zugriff: 29.08.2018).

⁷² zfes (2012), http://www.zfes.uni-stuttgart.de/deutsch/downloads/20120727_Final_Stromspeicherpotenziale_fuer_Deutschland-.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

⁷³ SEFEP (2012), „Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität“.

hoher Leistung ein- und ausspeichern können.⁷⁴ Jedoch haben sie auf Grund der hohen Masse eine eher geringe spezifische Energiedichte.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: Aktuell sind hierzu keine Forschungs- und Entwicklungsprojekte in Thüringen bekannt. Zuletzt beschäftigte sich im Jahr 2005 das Verbundprojekt „DYNASTORE“ mit Thüringer Beteiligung durch das IPHT Jena mit Schwungmassenspeichern.⁷⁵

3.4.2 Chemische Energiespeicher

Chemische Energiespeicher speichern die zugeführte Energie in Form chemischer Bindungen. Zumeist bedeutet dies, dass ein Stoff- oder Stoffgemisch als Energieträger in einem entsprechenden Behälter gelagert wird. Beim Ein- bzw. Ausspeichern wird der jeweilige Energieträger in den jeweiligen Behälter eingelagert bzw. aus diesem herausgeführt, um anschließend energieaufnehmende bzw. -abgebende Umwandlungsprozesse durchführen zu können. Als Energiespeicher ist in diesem Bereich also die Einheit aus Behälter und Energieträger zu verstehen.

3.4.2.1 Gasspeicher

Die Gasspeicherung zählt zu den konventionellen Methoden der Speicherung chemischer Energie(träger). Dabei wird ein gasförmiger Brennstoff (z. B. Wasserstoff, Erdgas) in einem Behälter unter hohem Druck gespeichert. Dies kann oberirdisch in speziell dafür errichteten Tanks geschehen. Zur Speicherung großer Energiemengen hat sich jedoch die Speicherung im Untergrund bewährt.

Man unterscheidet hauptsächlich zwei Formen: **Kavernenspeicher** und **Porenspeicher**. Bei ersteren handelt es sich z. B. um Salzkavernen, also große zusammenhäng-

ende Hohlräume die mehrere Millionen Kubikmeter an Gas fassen können. Porenspeicher hingegen nutzen stark poröse Gesteinsschichten im Untergrund und speichern das Gas unter Druck in den Poren dieser Schichten. Während in Deutschland klassischerweise bisher fossiles Erdgas in solchen Speichern gelagert wurde, können theoretisch auch aus regenerativen Quellen gewonnenes synthetisches Erd- und Biogas, sowie Wasserstoff eingespeichert werden.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: In Thüringen beschäftigt sich seit einigen Jahren die chemisch-geowissenschaftliche Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität durch die Projekte H2STORE (bis 2015) und HyINTEGER (seit 2016) mit der genaueren Untersuchung von Untergrundspeichern und insbesondere deren Eignung für die Wasserstoffspeicherung.^{76,77}

3.4.2.2 Thermochemische Wärmespeicher

Die Wärmespeicher mit der theoretisch höchsten Speicherdichte sind die thermochemischen Wärmespeicher. Dabei wird die zugeführte Wärme beim Einspeichern für chemische oder physikalische Reaktionen genutzt, die beim Ausspeichern wieder umgekehrt werden und dabei die zuvor zugeführte Wärme wieder freigeben. Man unterscheidet chemisch reversible Reaktionen, Adsorptionsprozesse und Absorptionsprozesse. Chemisch reversible Reaktionen sind grundsätzlich alle chemischen Reaktionen, die umkehrbar sind. Für die praktische Anwendung ist es dabei wichtig, dass die Reaktionen in einem Temperaturbereich von 10 bis 100 °C ablaufen, was die verwendbaren Stoffpaare erheblich einschränkt. Eine weitere Grundvoraussetzung ist, dass die Stoffpaare nach der Reaktion und für die Speicherung leicht voneinander getrennt werden können. Als besonders geeignet gelten Dissoziationsreaktionen, bei denen ein

⁷⁴ DCTI (2013), Speichertechnologien 2013 - Technologien, Anwendungsbereiche, Anbieter.

⁷⁵ EnArgus Informationssystem (2017), <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=%2201017843/1%22&v=10&id=3063673> (Zugriff: 29.08.2018).

⁷⁶ <http://www.igw-ahg.uni-jena.de/en/Workgroup/Research/Projects/H2STORE-p-452.html> (Zugriff: 29.08.2018).

⁷⁷ HyINTEGER-Projektwebsite, <https://www.hyinteger.com/> (Zugriff: 29.08.2018).

Ausgangsstoff AB beim Einspeichern unter Wärmezufuhr in zwei Stoffe A und B zerlegt wird. Dabei sollten die beiden Stoffe idealerweise in unterschiedlichen Aggregatzuständen vorliegen, damit sie leicht getrennt werden können. Oft werden beispielsweise Salzhydrate oder Hydroxide verwendet, die bei der Reaktion in reine Salze und Wasserdampf zerfallen. Da der gasförmige Zustand des Wasserdampfs das Volumen des Speichers stark erhöhen (und damit die Energiedichte senken) würde, wird das Wasser kondensiert und bis zur Ausspeicherung in dieser Form gelagert.

Im Gegensatz dazu finden bei Ad- bzw. Adsorptionsspeichern keine chemischen Reaktionen statt, sondern eine physikalische An- bzw. Einlagerung von Molekülen. Dabei sind in einem Adsorptionsspeicher Moleküle an der Oberfläche eines hochporösen Trägermaterials angelagert. Beim Einspeichern wird durch die zugeführte Wärme die Bindungen zwischen den Molekülen und dem Trägermaterial gelöst. Die abgelösten Moleküle bilden dann zum Beispiel ein Gas, das aus dem Trägermaterial durch eine Luftströmung entfernt werden kann. Beim Ausspeichern wird das Gas bei niedrigerer Temperatur wieder eingeleitet und die Moleküle lagern sich erneut an der Oberfläche des Trägermaterials an, wodurch die frei werdende Bindungsenergie als Wärme abgeleitet wird. Häufig wird als Adsorptionsmaterial Wasser(dampf) verwendet und als hochporöses Trägermaterial ein Stoff mit großer innerer Oberfläche und hygroskopischen Eigenschaften, wie z. B. Aluminiumoxid, Silicagel oder Zeolithe.⁷⁸ Bei einer Adsorption finden ähnliche Prozesse statt, wobei sich die Moleküle jedoch nicht an der Oberfläche des Trägermaterials anlagern, sondern in diesem gelöst werden. Das Trägermaterial ist dann ein (meist flüssiges) Lösungsmittel (z. B. Wasser),

in dem andere Stoffe (z. B. Lithiumbromid (LiBr), Ammoniak (NH₃), Schwefelsäure (H₂SO₄)) gelöst (absorbiert) werden. Thermochemische Wärmespeicher sind im Vergleich zu anderen Wärmespeichertechnologien noch am wenigsten erforscht und bergen daher große Forschungs- und Entwicklungspotenziale. Diese liegen im Bereich neuer Materialien, Zyklenstabilität, kalendari-sche Lebensdauer und Kosteneffizienz.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: Im Freistaat ist die CWK Chemiewerk Bad Köstritz GmbH im Bereich der Materialforschung für thermochemische Energiespeicher tätig und an entsprechenden Projekten beteiligt.^{79,80} Dabei liegt die Expertise insbesondere auch im Bereich der Zeolithe, wo sie nach eigenen Angaben derzeit der „einzige Anbieter von kompakten Zeolithformkörpern mit 100% Aktivkomponentenanteil“ sind.⁸¹ Aber auch das Fraunhofer IKTS weist Forschungsaktivitäten in der Zeolithentwicklung auf. Hierbei ist vor allem der Wachstumskern „autartec®“, der sich mit der Entwicklung von Technologie zur vollständigen Versorgung von Gebäuden mit eigenerzeugter Energie beschäftigt, zu nennen.⁸²

3.4.2.3 Feststoffakkumulatoren

Feststoffakkumulatoren sind die klassischen Akkumulatoren (oft trotz ihrer Wiederaufladbarkeit vereinfachend als Batterie bezeichnet), die die zugeführte elektrische Energie in chemische Energie umwandeln und auf diese Weise einspeichern. Im Umkehrprozess wird die chemisch gebundene Energie wieder in Form elektrische Energie ausgespeichert. Sie bestehen aus zwei Feststoffelektroden (zumeist) unterschiedlicher Materialien, die durch einen flüssigen oder gelartigen Elektrolyten und ggf. zusätzlich durch eine zwischen ihnen befindliche

⁷⁸ Sterner (2017), Energiespeicher - Bedarf, Technologie, Integration. 2. Auflage, Springer-Verlag, Deutschland.

⁷⁹ BINE Informationsdienst (2017), <http://www.bine.info/themen/energiesysteme/waerme-kaeltespeicherung/publikation/waermespeicher-inform-gebracht/> (Zugriff: 29.08.2018).

⁸⁰ Energiespeicher Forschungsinitiative (2017), http://forschung-energiespeicher.info/waerme-speichern/projektliste/projekt-einzelansicht/108/Langzeitwaermespeicher_zur_Gebaeudebeheizung/ (Zugriff: 31.08.2018).

⁸¹ Chemiewerk Bad Köstritz GmbH (2017), <http://www.cwk-bk.de/de/produkte/molekularsiebe/zeolithe/> (Zugriff: 29.08.2018).

⁸² Wachstumskern autartec, Website, <https://www.autartec.de/partner> (Zugriff: 29.08.2018).

Trennschicht (Separator) voneinander getrennt sind. Dieser Separator dient der Verhinderung von Kurzschlüssen. Im Elektrolyten befinden sich gelöste Ionen. Beim Laden/Einspeichern wird elektrische Energie dazu genutzt, chemische Reaktionen an den Elektroden in Gang zu setzen, indem Elektronen durch eine von außen angelegte elektrische Spannung von der einen Elektrode (Kathode) zur anderen Elektrode (Anode) gezwungen werden. Die Änderungen der chemischen Struktur der Elektrodenmaterialien sorgt für eine Umwandlung und Speicherung der zugeführten elektrischen Energie in die Energie der neuen chemischen Verbindungen. Beim Ausspeichern wird dieser Prozess umgekehrt, wobei die gespeicherte chemische Energie wieder in elektrische Energie gewandelt wird. Energie- und Leistungsdichten, Lebensdauern, Betriebssicherheit etc. sind dabei stark abhängig von den jeweils verwendeten Elektrodenmaterialien und Elektrolytzusammensetzungen. Typische kommerzielle Vertreter sind Blei-Säure-Akkus und Nickel-Metallhydrid-Akkus. Die derzeit am weitesten fortgeschrittene Technologie sind allerdings Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Darüber hinaus befinden sich weitere Typen im Forschungs- und Entwicklungsstadium, wie zum Beispiel die Lithium-Schwefel- und Natrium-Ionen-Akkus.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: Innerhalb Thüringens beschäftigt sich die TU Ilmenau mit der Erforschung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren, wobei das Hauptaugenmerk auf neuen Materialien für den Elektrolyten und für die negative Elektrode liegt.⁸³ Das CEEC Jena forscht im Bereich der Feststoffakkumulatoren an Natrium-Ionen-Batterien als Alternative zu Lithium-Ionen-Batterien. Dabei wird diese Speichertechnologie sowohl in Bezug auf grundlegende Mechanismen, als auch

mit Blick auf material- und anwendungsspezifische Problemstellungen erforscht.⁸⁴ Außerdem werden Möglichkeiten untersucht, auf Basis organischer Stoffe Feststoffelektroden für wiederaufladbare Batterien herzustellen.⁸⁵ Das Fraunhofer IKTS arbeitet im Rahmen des EMBATT-Projektes mit dem Teilprojekt „ePadFab“ an „Innovativen Technologien zur industriellen Herstellung integrierter, großformatiger Bipolarbatterien“.⁸⁶ Außeruniversitär entwickelt derzeit die IMG Electronic & Power Systems GmbH im Rahmen eines FuE-Projektes einen „Hochleistung-Elektro-Energiespeicher mit Lithium-Ionen-Zelltechnologie für den mobilen und stationären Einsatz“. Ziel ist ein modulares System mit einer Speicherkapazität über 100 kWh und einer Spannung von 100 V bis 1.200 V, wobei der Fokus der Entwicklung auf Sicherheits- und Zuverlässigkeitsaspekten liegt.⁸⁷ Im Bereich der Anlagenentwicklung für die Materialgewinnung für Lithium-Ionen-Akkus ist außerdem die K-UTEC AG Salt Technologies in Sondershausen tätig.⁸⁸

3.4.2.4 Hochtemperaturbatterien

Neben klassischen Feststoffakkumulatoren, die bei Umgebungstemperatur betrieben werden, existieren auch noch sogenannte Hochtemperaturbatterien. Diese haben grundsätzlich einen sehr ähnlichen Aufbau wie die klassischen Akkus, besitzen aber anstelle eines flüssigen oder gelartigen Elektrolyten einen Feststoffelektrolyten. Letztere sind ionenleitende Keramiken, die bei hohen Temperaturen (mehr als 270 °C) eine gute ionische Leitfähigkeit aufweisen. Da diese Leitfähigkeit für den Betrieb der Batterie notwendig ist, können diese Batterien nur mit einem entsprechenden thermischen Management betrieben werden. Dabei kann die Reaktionswärme der Batterie genutzt werden, um die entspre-

⁸³ TU-Ilmenau (2017), <https://www.tu-ilmenau.de/en/wt-ecg/research/energiespeicher-und-wandler/> (Zugriff: 29.08.2018).

⁸⁴ FSU Jena (2017), http://www.chemgeo.uni-jena.de/Institute/Institut+f%C3%BCr+Technische+Chemie+und+Umweltchemie/Prof_+Dr_+Philipp+Adelhelm.html (Zugriff: 29.08.2018).

⁸⁵ CEEC Jena (2017), <http://www.ceec.uni-jena.de/Forschungsgebiete/Energiespeicherung/ORB.html> (Zugriff: 29.08.2018).

⁸⁶ EMBATT-Projektwebsite, <https://www.embatt.de/projekte.html> (Zugriff: 29.08.2018).

⁸⁷ IMG Electronic & Power Systems GmbH (2017), <http://www.img-nordhausen.de/de/energiespeicher1.html> (Zugriff: 29.08.2018).

⁸⁸ K-UTEC AG Salt Technologies (2017), <https://www.k-utec.de/fileadmin/redakteur/News/Dokumente/20140704%20Akkus.pdf> (Zugriff: 29.08.2018).

chenden Temperaturen aufrechtzuerhalten. Eine Heizung ist dann nicht notwendig. Voraussetzung dafür ist jedoch ein nahezu durchgängiger Betrieb, wodurch sich die Batterien eher weniger für Standby-Anwendungen nutzen lassen. Der große Vorteil dieser Batterien ist, dass sie keine Kühlung und damit keine Klimaanlage benötigen. Sie können daher zu jeder Jahreszeit und in jeder Klimaregion der Erde auch Outdoor aufgestellt werden. Die bekanntesten Typen sind Natrium-Nickelchlorid- (NaNiCl_2) und Natrium-Schwefel-Batterien (NaS). NaS-Batterien spielen heute keine große Rolle mehr, da die dafür nötige Sicherheitstechnik den theoretischen Preisvorteil überkompensiert. Für stationäre Großanlagen wird heute nahezu ausschließlich die NaNiCl_2 -Zelle entwickelt und angeboten. Dieser Zelltyp besteht nur aus Metallen und Keramik und kann daher im Gegensatz zur NaS-Zelle weder brennen, noch einen gefährlichen Innendruck aufbauen. Im Fehlerfall setzt dieser Zelltyp zudem nur sehr geringe thermische Energie frei, ist also insgesamt sehr sicher.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: In Thüringen arbeitet das Fraunhofer IKTS Hermsdorf im Rahmen der Technologieplattform *cerenergy*[®] an der Entwicklung von Hochtemperaturbatterien.⁸⁹ Entwickelt werden NaNiCl_2 -Batterien für vorwiegend stationäre Anwendungen sowie Verfahren zu ihrer Herstellung in industrieller Massenproduktion (> 1 GWh pro Jahr, d.h. ca. 3 Mio. Zellen). Dabei werden das Zell- und Systemdesign, die verwendeten Materialien sowie die Fertigungstechnologien gesamthaft betrachtet. Die Zielkosten sollen auf der Zellebene um die 70 bis 100 €/kWh liegen. Die Arbeiten in Hermsdorf umfassen zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Studie (August 2018) ein Projektcluster von mehr als 15 Mio. Euro. Damit ist diese Thüringer Aktivität eines der global größten Zentren der Entwicklung von keramischen Hochtemperaturbatterien. Gegenwärtig er-

folgt die Einbindung der Keramikindustrie in der Region Thüringen und Oberfranken in die Industrialisierung von Komponenten und Zellen.

3.4.2.5 Brennstoffzellen

Brennstoffzellen im herkömmlichen Sinn sind für sich genommen keine Energiespeicher, sondern Energiewandler, die chemische in elektrische Energie umwandeln. Im Kontext einer Wasserstoffwirtschaft bzw. der flächendeckenden Verwendung von wasserstoffbasierten Energielösungen sind sie jedoch eine essenzielle Technologie. Im Wesentlichen bestehen Brennstoffzellen aus zwei durch eine halbdurchlässige Schicht (Membran) getrennte Kammern. In diesen Kammern befindet sich jeweils eine (dünne) poröse Elektrode, an der die jeweilige chemische Reaktion stattfindet. Dabei reagiert immer Sauerstoff mit einem Brennstoff, um elektrische Energie zu gewinnen. Der bekannteste Brennstoff ist dabei Wasserstoff. Es existieren allerdings noch weitere Brennstoffzellen-Typen, in denen z. B. Methanol, Ameisensäure, Kohlenstoff oder Magnesium als Brennstoffe verwendet werden. Neben den herkömmlichen Brennstoffzellen, gibt es allerdings auch reversible Brennstoffzellen, die neben der Stromgewinnung auch zur Stromspeicherung fähig sind. Dazu werden in der Regel herkömmliche Brennstoffzellen mit einem Elektrolyseur gekoppelt oder Brennstoffzellen genutzt die gleichzeitig selbst als Elektrolyseur arbeiten können (z. B. Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen, Festoxidbrennstoffzellen). Solche reversiblen Brennstoffzellen sind eng mit der Power-to-Gas-Technologie verknüpft.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: In Thüringen beschäftigt sich die TU Ilmenau mit der Weiterentwicklung von Brennstoffzellen, insbesondere Direkt-Methanol-Mikrobrennstoffzellen.⁹⁰ Darüber hinaus sind keine weiteren Projekte bekannt, die auf Brennstoffzellenent-

⁸⁹ Fraunhofer IKTS (2017), https://www.ikts.fraunhofer.de/de/departments/energy_bio-medical_technology/system_intgeration_technology_transfer/stationary_energy_storage/cerenergy.html (Zugriff: 29.08.2018).

⁹⁰ TU Ilmenau (2017), <https://www.tu-ilmenau.de/de/ttd/forschung/energiespeicherung/> (Zugriff: 29.08.2018).

wicklung ausgerichtet sind. Jedoch gibt es einige Projekte, in denen Brennstoffzellen ein wesentlicher Technologie-Bestandteil sind. Diese sind jedoch eher den Power-to-X-Technologien zuzuordnen und werden deswegen im Abschnitt 3.4.5 besprochen.

3.4.2.6 Redox-Flow-Batterien

Genau wie klassische Akkumulatoren und Brennstoffzellen, basieren Redox-Flow-Batterien auf der Umwandlung elektrischer Energie in chemische Energie (Laden/Einspeichern) bzw. dem umgekehrten Prozess (Entladen/Ausspeichern). Allerdings liegen die chemischen Stoffe der beiden Elektroden nicht in fester oder gasförmiger Form vor, sondern sind in einer Flüssigkeit (dem Elektrolyten) gelöst. Die Elektrolyte der beiden Pole der Batterie werden in Tanks gelagert und fließen – durch Pumpen angetrieben – während des Betriebs durch eine Zelleinheit. Letztere besteht aus zwei Kammern mit porösen Elektroden (zumeist aus Graphit), die voneinander durch eine halbdurchlässige Membran getrennt sind. Werden im Betrieb die beiden Elektrolyte durch die porösen Elektroden gepumpt, finden an der Elektrodenoberfläche die chemischen Reaktionen statt. Diese können durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen den Elektroden der beiden Kammern erzwungen werden (Einspeichern) oder laufen in entgegengesetzter Richtung von allein ab und setzen dabei Energie frei (Ausspeichern). Wie bei Brennstoffzellen wird die Speicherkapazität dieser Batterieart von der Menge des Speichermediums (Elektrolyt) und die Leistung von der Größe und Ausgestaltung der besagten Zelleinheit bestimmt. Dadurch unterscheidet sich diese Speichertechnologie von anderen, weil Leistung und Kapazität unabhängig voneinander und unkompliziert skaliert werden können. Diese einfache und flexible Skalierbarkeit ist zugleich der Hauptvorteil von Redox-Flow-Batterien. Darüber hinaus sind die Bestandteile der Batterie einzeln austauschbar und die Batterie an sich erweiterbar. Ein weiterer Vorteil liegt in der relativ hohen Zyklenlebens-

dauer (> 10.000). Redox-Flow-Batterien sind in der Lage, sowohl Energie über mehrere Stunden zur Verfügung zu stellen, als auch kurzfristig Lastspitzen auszugleichen. Durch ihre vergleichsweise geringe Energiedichte ist ihr Anwendungsbereich derzeit eher im stationären Bereich zu sehen. Man unterscheidet wie bei anderen Batterietypen verschiedene Materialien. Die derzeit am weitesten fortgeschrittene und kommerzialisierte Variante ist die Vanadium-Redox-Flow-Batterie. Darüber hinaus existieren viele weitere metallbasierte Systeme, u. a. Zink-Brom- und Eisen-Chrom-Flow-Batterien. Die verwendeten Materialien können aber auch auf organischen Molekülen wie z. B. Chinonen, TEMPO- und Viologen-Derivaten basieren.

Nachteile dieser Technologie liegen vor allem in den relativ geringen Energiedichten im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien. Auch wenn erste Demonstrationsanlagen bereits bestehen, sind noch weitere Anstrengungen in Forschung und Entwicklung notwendig, um die Marktreife dieser Technologie zu erreichen.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: Innerhalb Thüringens forscht die Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU Jena) an Redox-Flow-Batterien. So wurde am Center for Energy and Environmental Chemistry Jena (CEEC Jena) eine Polymer-Redox-Flow-Batterie entwickelt, die organische Polymere anstelle schwermetallhaltiger Aktivmaterialien als Speichermedium nutzt. Die ansonsten gebräuchlichen, oft in säurehaltigem Elektrolyten gelösten Metall-Ionen können hierdurch von Polymeren (Kunststoffen) in einer wässrigen Kochsalzlösung ersetzt werden. Damit können auch kostenintensive, ionenleitfähige Membranen durch kostengünstigere Dialysemembranen und die säurehaltigen Elektrolyten durch Kochsalzlösungen ersetzt werden. Nachteilig sind die noch geringeren Löslichkeiten und die damit verbundenen geringeren Energiedichten, sowie die höheren Viskositäten der Polymerlösungen. Am CEEC Jena werden die Grundlagen erforscht. In Zusammenarbeit mit der Ausgründung JenaBatteries GmbH erfolgt die Ent-

wicklung serientauglicher Produkte.^{91,92} Weiterhin wurde die vorgenannte Forschung im Rahmen des Projektes NovelFlow von der Kustan GmbH & Co. KG aus Rudolstadt durch die Entwicklung eines Batteriegerüsts für polymerbasierte Redox-Flow-Batterien unterstützt. Im Rahmen des EU-Projekts Energykeeper wird eine 30 kW RFB in den Niederlanden installiert.⁹³

3.4.3 Elektrische Energiespeicher

Elektrische Energiespeicher speichern die zugeführte Energie in Form elektrischer Energie bzw. in Form elektrischer (oder magnetischer) Felder. Es gibt derzeit zwei für die Energiewende relevante Vertreter dieser Energiespeicherart.

3.4.3.1 Supraleitende Magnetspulen

Fließt elektrischer Gleichstrom durch eine herkömmliche Spule, baut sich durch den Stromfluss ein stabiles magnetisches Feld auf. Dabei wird die durch den Strom bereitgestellte elektrische Energie als Energie des Magnetfeldes eingespeichert. Das sich ausbildende Magnetfeld bleibt solange bestehen, wie Strom fließt. Dieser Effekt wird in vielen elektrischen und elektronischen Geräten in Form von Elektromagneten genutzt.

Supraleitende Spulen sind spezielle Spulen aus sogenannten supraleitenden Materialien (z. B. Niob-Titan (NbTi) oder Niob-Zinn (Nb₃Sn)), die bei tiefen Temperaturen (derzeit unter -250 °C) dazu in der Lage sind, Strom ohne Verluste zu leiten. Das bedeutet, dass Strom, der einmal in eine supraleitende Spule eingespeist wurde, theoretisch für immer durch diese zirkuliert. Dadurch wird dauerhaft Energie in der Form eines stabilen Magnetfeldes gespeichert. Um die Energie wieder auszuspeichern, wird der Strom entsprechend über einen Schalter aus dem supraleitenden Stromkreis der Spule ausgekop-

pelt. Vorteilhaft ist die lange, nahezu verlustfreie Speicherung. Die Betriebstemperatur von unter -250 °C erfordert hingegen einen hohen energetischen Kühlaufwand, der derzeit nur mithilfe von energieintensivem flüssigem Stickstoff oder Helium gewährleistet werden kann.⁹⁴ Supraleitende Spulen sind als Großanlagen derzeit eher unwirtschaftlich, da bspw. für eine Speicherkapazität von 5.000 MWh der Spulendurchmesser etwa 100 Meter betragen müsste. Aus diesem Grund kann diese Technologie eher nur in kleineren Anlagen zur Spannungs- und Frequenzhaltung eingesetzt werden.⁹⁵

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: Aktuell sind hierzu keine Forschungs- und Entwicklungsprojekte in Thüringen bekannt.

3.4.3.2 Doppelschichtkondensatoren

Doppelschichtkondensatoren (auch: Superkondensatoren) ähneln in ihrem Aufbau stark Akkumulatoren, von denen sie sich jedoch darin unterscheiden, dass im Grundprinzip weder beim Ein- noch beim Ausspeichern (elektro)chemische Reaktionen stattfinden. Stattdessen werden hochporöse Kohlenstoffmaterialien als Elektroden verwendet, die auf sehr kleinem Raum sehr hohe Oberflächen bieten. Diese Materialien stehen in Kontakt mit einem Elektrolyten, in dem positive und negative Ionen gelöst sind. Beim Einspeichern wird elektrische Energie dazu verwendet Elektronen wie in einem herkömmlichen Kondensator von der einen Elektrode zur anderen zu bewegen. Durch den entstehenden Ladungsüberschuss in den Elektroden werden die gelösten gegensätzlich geladenen Ionen im Elektrolyten zur Oberfläche des porösen Materials gezogen. Durch den geringen Abstand zwischen Ionen und Elektrodenoberfläche entstehen starke elektrische Felder, in denen – im Vergleich zu herkömmlichen Kondensatoren – viel Energie gespei-

⁹¹ CEEC Jena (2017), https://www.ceec.uni-jena.de/Woran%20forschen%20wir_/Energiespeicherung.html (Zugriff: 29.08.2018).

⁹² JenaBatteries GmbH (2017), <http://jenabatteries.com/> (Zugriff: 29.08.2018).

⁹³ <https://jenabatteries.com/blog/2019/03/18/energykeeper-project/> (Zugriff: 13.06.2019).

⁹⁴ AEE (2012), https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/382.75_Renews_Spezial_Strom_speichern_Dez2014_online.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

⁹⁵ ZSW (2007), https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/files/private/active/0/eeg_forschungsbericht5_7.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

chert ist. Beim Ausspeichern wird der Prozess umgekehrt und die elektrischen Felder sorgen dafür, dass Ladungsträger sich wieder gleichmäßig über beide Elektroden verteilen. Da keine chemischen Reaktionen oder andere Umwandlungsprozesse beteiligt sind, können hohe Leistungsdichten und sehr hohe Wirkungsgrade erreicht werden.⁹⁶ Durch ihre hohe Selbstentladungsrate eignen sich Doppelschichtkondensatoren jedoch nur für die Speicherung elektrischer Energie über kurze Zeiträume.⁹⁷ Der wesentliche Nachteil sind die hohen Speicherkosten sowie die relativ geringe Energiedichte.⁹⁸

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: Innerhalb Thüringens wird vor allem am CEEC Jena an Superkondensatoren geforscht. Dabei liegt der Fokus auf neuen Elektrolyten und der Optimierung der Elektrodenstrukturen.⁹⁹

3.4.4 Thermische Energiespeicher

Thermische Energiespeicher sind Speicher, die die zugeführte Energie in Form von thermischer Energie (Wärme) in einem Speichermedium speichern. Dabei unterscheidet man zwei Typen von Wärmespeichern: Sensible Wärmespeicher und latente Wärmespeicher.

3.4.4.1 Sensible Wärmespeicher

Bei der sensiblen Wärmespeicherung sorgt die zugeführte Energie für eine Erhöhung der Temperatur des Speichermediums, ohne dass sich dabei dessen Aggregatzustand ändert. Da sich die gesamte zugeführte Wärme als „wahrnehmbare“ Temperaturänderung äußert, wird diese Art der Wärmespeicherung als „sensible“ (lat. *sensibilis*) Wärmespeicherung bezeichnet.

Die Speicherkapazität ist abhängig von der spezifischen Wärmekapazität und von der Masse des Speichermediums, sowie der Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebung die im konkreten Anwendungsfall realisierbar ist. Bei sensiblen Speichern können flüssige oder feste Speichermedien wie Wasser, Magnesit, Beton oder Erde Verwendung finden. Wasser ist das am häufigsten verwendete Speichermedium, da es eine hohe Wärmekapazität besitzt, einfach zu handhaben und umweltverträglich ist. Anwendungsbeispiele sind z. B. Heißwasser- oder Dampfspeicher, sowie Kies-Wasser- oder Erdsondenwärmespeicher. Aufgrund des hohen Temperaturunterschiedes zwischen Speichermedium und Umgebung muss das Speichermedium thermisch gut isoliert sein. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Wärmeverluste proportional zum Oberflächeninhalt der Grenzfläche zwischen Speichermedium und Umgebung sind, die gespeicherte Energiemenge jedoch proportional zum Volumen des Speichermediums ist, weswegen die Effizienz bei größeren Speichervolumina steigt.¹⁰⁰

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: Im Bereich sensibler Wärmespeicherung forscht innerhalb Thüringens aktuell vor allem die TU Ilmenau.¹⁰¹ Aber auch die IAB Weimar gGmbH ist in mehreren ZIM-Kooperationsprojekten mit einem Unternehmen außerhalb Thüringens an der Erforschung neuer Materialien für sensible oder kombiniert sensible und latente Wärmespeicherung beteiligt.¹⁰² Weiterhin arbeitet die Plecher & Herden GmbH aus Rückersdorf an der „Entwicklung und Erprobung eines mobilen thermischen Feststoffspeichers“.¹⁰³

⁹⁶ Fraunhofer ISE et al. (2009), http://moodle.zhaw.ch/pluginfile.php/497677/mod_folder/content/0/Speichertechnik%20Elektroenergie%20Studie%20Fraunhofer%202009.pdf?forcedownload=1 (Zugriff: 29.08.2018).

⁹⁷ Mauch et al. (2009), Anforderungen an elektrische Energiespeicher. (F. f. e.V., Hrsg.) München.

⁹⁸ SEFEP (2012), „Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität“.

⁹⁹ CEEC Jena (2017), http://www.chemgeo.uni-jena.de/Institute/Institut+f%C3%BCr+Technische+Chemie+und+Umweltchemie/Prof_+Dr_+Andrea+Balducci.html (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁰⁰ Sterner (2017), Energiespeicher - Bedarf, Technologie, Integration. 2. Auflage, Springer-Verlag, Deutschland.

¹⁰¹ TU Ilmenau (2017), <https://www.tu-ilmenau.de/ttd/forschung/energiespeicherung/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁰² Daten entstammen der Antwort auf eine im Rahmen dieser Studie gestellten Anfrage an die IAB Weimar gGmbH (Stand: 29.08.2018).

¹⁰³ Plecher & Herden GmbH, Website des Unternehmens, <http://www.plecher-herden.de/forschungsprojekte.html> (Zugriff: 29.08.2018).

3.4.4.2 Latente Wärmespeicher

Auch bei der latenten Wärmespeicherung wird Energie in Form von Wärme einem Speichermedium zugeführt. Im Unterschied zur sensiblen Wärmespeicherung sorgt die zugeführte Wärme aber in erster Linie für eine Änderung des Aggregatzustands (sogenannter „Phasenwechsel“) ohne wesentliche Änderung der Temperatur. Die gespeicherte thermische Energie ist deswegen „verborgen“ – also „latent“ (lat. *latens*) – vorhanden. Die Speichermedien werden auf Grund des stattfindenden Phasenwechsels als *Phase Change Materials (PCM)* bezeichnet. Der Phasenübergang kann von fest zu flüssig oder von flüssig zu gasförmig stattfinden. Je höher die für den Phasenwechsel nötige bzw. freisetzbare thermische Energie ist, desto größer ist die im Speichermedium speicherbare Energiemenge (Speicherkapazität). Im Falle eines Phasenübergangs fest-flüssig entspricht die latente Wärme der Schmelz- oder Kristallisationswärme des Speichermediums. Der Phasenübergang flüssig-gasförmig zeigt zwar bei den meisten Stoffen eine wesentlich höhere spezifische Verdampfungs-/Kondensationswärme, ist aber aufgrund der starken Veränderung der Dichte (bei Wasser-/Wasserdampf etwa mit dem Faktor 1000) technisch nur schwer beherrschbar. Gängige PCMs sind beispielsweise Wasser/Eis, Paraffin, Natriumsulfat, Natriumacetat. Aber auch andere organische und anorganische Salze mit geeigneter Schmelztemperatur finden ihre Anwendung.¹⁰⁴

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: In Thüringen hat in den vergangenen Jahren die H.M. Heizkörper

GmbH & Co. KG einen latenten Wärmespeicher für den Heimgebrauch entwickelt.^{105,106} Die Thermobatterien L-O-T und SU-C weisen Kapazitäten von 2 bis 35 kWh auf und machen sich zusätzlich zum Phasenwechsel die Eigenschaften einer „unterkühlten Schmelze“ zunutze. H.M. Heizkörper ist darüber hinaus derzeit am „Verbundvorhaben PCM in Demonstrationsanwendungen“ beteiligt.¹⁰⁷ Weiterhin beteiligte sich die Bauhaus-Universität Weimar bis Ende 2015 am „ENBELAT“-Projekt zur Latentwärmespeicherung mit dem Ziel der Steigerung der Energieeffizienz in industriellen Anlagen.¹⁰⁸ In einem weiteren Verbundprojekt („ThessaPor“) forschte die Bauhaus-Universität Weimar bis Juli 2017 außerdem mit an der Erhöhung der Speicherdichte von Salzhydratspeichern.¹⁰⁹ Darüber hinaus erhielt die ESDA Technologie GmbH in Eisenberg im Jahr 2016 eine EU-Förderung zur Kommerzialisierung ihrer PCM-Makroverkapselung „Hi-Therm-Cap“.^{110,111} Es war zudem die K-UTEC AG Salt Technologies in Sondershausen in der Vergangenheit im Bereich der Latentwärmespeicherforschung und -entwicklung tätig.¹¹² Auch die IAB Weimar gGmbH ist in mehreren ZIM-Kooperationsprojekten mit einem Unternehmen außerhalb Thüringens an der Erforschung neuer Materialien für Wärmespeicher mit kombinierter sensibler und latenter Wärmespeicherung beteiligt.¹⁰² Abschließend kann das Thüringische Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (TITK) in Rudolstadt genannt werden, das ebenfalls seit langem im Bereich der Wärmespeicherung tätig ist. Aktuell wird dort im Projekt „PCM4all“ an polymergebundenen PCMs geforscht.¹¹³

¹⁰⁴ Sterner (2017), *Energiespeicher - Bedarf, Technologie, Integration*. 2. Auflage, Springer-Verlag, Deutschland.

¹⁰⁵ TMUEN (2017), <http://www.energiegewinner-thueringen.de/energiegewinner/details-zu/hm-heizkoerper-gmbh-co-kg.html> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁰⁶ H.M. Heizkörper GmbH & Co. KG (2017), <http://hm-heizkoerper.de/die-thermobatterie/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁰⁷ EnArgus Informationsdienst (2017), https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=w%3a4rmespeicher&id=2807307&v=10&d=place_facet_enargus_ort_st/Th%3%bcringen (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁰⁸ Energiespeicher Forschungsinitiative (2017), http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht//Abwaerme_fuer_Herstellung_von_Betonfertigteilen_nutzen/ (Zugriff: 31.08.2018).

¹⁰⁹ Energiespeicher Forschungsinitiative (2017), http://forschung-energiespeicher.info/waerme-speichern/projektliste/projekt-einzelansicht/108/Speicherdichte_mit_Salzhydraten_erhoehen/ (Zugriff: 31.08.2018).

¹¹⁰ Pressebox (2017), <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/eura-ag/EU-setzt-auf-PCM-Waermespeicherkapseln/boxid/784827> (Zugriff: 29.08.2018).

¹¹¹ ESDA Technologie GmbH (2017), <http://technologie.esda.de/presse/hithermcap.html> (Zugriff: 29.08.2018).

¹¹² K-UTEC AG Salt Technologies (2017), <https://www.k-utec.de/abteilungen/cpv-chemisch-physikalische-verfahrenstechnik/berichte-veroeffentlichungen.html> (Zugriff: 29.08.2018).

¹¹³ TITK e.V. (2017), <http://www.titk.de/3/forschung/aktuelle-forschungsvorhaben/index.html> (Zugriff: 29.08.2018).

3.4.5 Sektorkoppelnde Technologien

Über die vorhergehend beschriebenen Technologien hinaus gibt es Verfahren, die effektiv eine Speicherwirkung erzielen können, indem sie die Energieformen eines Sektors in die Energieformen eines anderen Sektors umwandeln – die sogenannte Sektorkopplung. Die am meisten diskutierten Technologien dieser Art koppeln den Stromsektor mit den übrigen Sektoren. Die wichtigsten der sogenannten Power-to-X-Technologien sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

3.4.5.1 Power-to-Heat

Bei Power-to-Heat handelt es sich um die Umwandlung elektrischer Energie in Wärmeenergie. Im Wesentlichen wird dazu ein Tauchsieder, also ein von Wasser umgebenes elektrisch leitendes Rohr (Heizstab) mit hoher Oberfläche und mit hohem elektrischem Widerstand, verwendet. Wird Strom durch dieses Rohr geschickt, erhitzt sich dieses durch den vorhandenen elektrischen Widerstand und gibt die erzeugte Wärme an das umgebende Wasser ab. Der in Wärme umgewandelte überschüssige Strom, kann dabei direkt in Nah- und Fernwärmenetze eingespeist oder für den Eigenverbrauch zur Heizung oder Warmwasseraufbereitung genutzt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit die erzeugte Wärme bei geringem Wärmebedarf in einen an die Anlage angeschlossenen Wärmespeicher zur späteren Verwendung zu speichern. Der Wirkungsgrad der Umwandlung von Strom zu Wärme ist nahezu 100% und damit äußerst energieeffizient und klimafreundlich – sofern der Strom aus überschüssiger Wind- und Sonnenenergie stammt. Noch dazu ist diese Technologie kostengünstig, wartungsarm und sehr langlebig.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: In Thüringen sind keine konkreten Forschungs- und Entwicklungsprojekte hierzu bekannt. Forschungsbedarf für das Verfahren besteht im Allgemeinen auf Grund des ohnehin hohen Wirkungsgrades nicht bei der Energiewandlung, sondern in der konkreten Anwendung der Technologie

für die Stabilisierung der Netze und der Erhöhung des Eigenverbrauchs in privaten und industriellen Anwendungsbereichen.

3.4.5.2 Power-to-Gas

Überschüssiger Strom aus erneuerbaren Energien kann ebenfalls dazu verwendet werden, verschiedene Gase zu synthetisieren. Eine Variante stellt dabei die Spaltung von Wasser in **Wasserstoff** und Sauerstoff dar. Der Wasserstoff kann als Brennstoff in Verbrennungsturbinen oder Brennstoffzellen rückverstromt werden. Deswegen eignet er sich ebenfalls als Speichermedium für regenerativen Strom, wenn er nach der Elektrolyse in Unterspeichern oder oberirdischen Tanks zwischengelagert wird. Eine weitere Nutzungsmöglichkeit des Wasserstoffs besteht in der Weiterverarbeitung zu **synthetischem Erdgas (Methan)** unter Verwendung von Kohlenstoffdioxid. Dieses Verfahren spart gegenüber der direkten Wasserstoffnutzung zwar kein CO₂ ein, ist aber zumindest CO₂ neutral und trägt damit auch nicht zu neuen Emissionen bei. Bisher kann das notwendige CO₂ für dieses Verfahren jedoch nicht auf wirtschaftlich tragbare Weise aus der Umgebungsluft gewonnen werden. Voraussetzung für Power-to-Gas mit synthetischem Erdgas ist deswegen, dass eine CO₂-Quelle vorhanden ist, die konzentriertes CO₂ zur Verfügung stellen kann. Dies könnte vor allem in Hinblick auf ein Energienetz mit hohem Anteil erneuerbarer Energien und folglich geringem CO₂-Ausstoß problematisch werden. Davon abgesehen hat synthetisches Erdgas den großen Vorteil, dass das vorhandene Erdgasnetz (samt Speichern) als Speicherkapazität genutzt und die bestehende Infrastruktur zur Erdgasverarbeitung (Transportnetze, Kraftwerke, Brennkessel für Heizungen etc.) weiterverwendet werden kann.

Sowohl für Wasserstoff als auch synthetisches Erdgas gilt, dass der „Rohstoff“ Wasser in ausreichender Menge verfügbar ist. Allerdings liegen die Kosten von Elektrolyseuren relativ hoch. Ein weiterer Nachteil ist bis heute

der geringe Wirkungsgrad bei der Umwandlung (unter 40%).¹¹⁴ Wobei dieser durch Nutzung der Abwärme noch weiter gesteigert werden kann.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: Mit der Kumatec GmbH in Neuhaus-Schoerschnitz engagiert sich ein Thüringer Unternehmen erfolgreich mit seinem Teilprojekt „LocalHY“ im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten HYPOS-Projekt.¹¹⁵ Das Unternehmen entwickelt einen Hochdruckelektrolyseur zur effizienteren Wasserstoffgewinnung, für welchen es im Jahr 2016 bereits mit dem IQ Innovationspreis Mitteldeutschland ausgezeichnet wurde.¹¹⁶ Darüber hinaus sind noch weitere Unternehmen, Forschungsinstitute und Hochschulen aus Thüringen Mitglieder im Netzwerk des HYPOS e.V.¹¹⁷ Allerdings sind keine weiteren, konkreten Pilotprojekte oder andere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Rahmen dieses Netzwerkes in Thüringen bekannt. Durch die Arbeit an Feststoffoxidelektrolysezellen (engl. Solid Oxide Electrolyser Cells (SOEC)) ist zudem das Fraunhofer IKTS in Hermsdorf an der Weiterentwicklung der Power-to-Gas-Technologie für eine effiziente Gewinnung von Wasserstoff durch die Elektrolyse von Wasser beteiligt.

Davon abgesehen hat das Land Thüringen im Power-to-Gas-Bereich nach eigenen Angaben die Forschung des Fraunhofer Instituts für Windenergie und Systemtechnik zur Direktmethanisierung von Biogas unterstützt.¹¹⁸

3.4.5.3 Power-to-Liquid

Im Power-to-Liquid-Verfahren wird überschüssiger Strom zur Herstellung von Mineralölen und anderen flüssigen Energieträgern genutzt. Dabei kann insbesondere die Power-to-Gas-Technologie als eine Art Vor-

stufe zum Einsatz kommen. Gewonnenes Erdgas kann – für einen einfacheren Transport – verflüssigt und wie fossiles Flüssigerdgas verwendet werden. Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid können zur Synthese von langkettigen Kohlenwasserstoffen für Kraftstoffe mittels Fischer-Tropsch-Verfahren genutzt oder in sogenannten flüssigen organischen Wasserstoffträgern (englisch: *liquid organic hydrogen carriers (LOHC)*) zur späteren Verwendung gespeichert werden. Es wird ebenfalls unter dem Namen Power-to-Chemicals diskutiert, auf diese Weise Grundchemikalien für die chemische Industrie herzustellen, die bisher aus fossilen Erdgas und Erdöl stammen.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: Die MUW Screentec GmbH in Erfurt beschäftigt sich im Rahmen des von der EU geförderten Projektes „Green Methanol“ mit der Entwicklung „Keramischer Membranreaktoren zur Effizienzsteigerung in der chemischen Verfahrenstechnik insbesondere bei ‚Power-to-X‘ Reaktionen“.¹¹⁹ Darüber hinaus betätigt sich das von der EurA AG in Zella-Mehlis koordinierte Innovationsnetzwerk „modulares Wasserstoffkraftwerk“ aktiv im Bereich der Wasserstoffspeicherung in LOHCs zur Speicherung überschüssiger elektrischer Energie aus erneuerbaren Stromquellen.¹²⁰

3.5 Sektorkopplung und Ausnutzung von Synergieeffekten der unterschiedlichen Speichertechnologien

Neben den Power-to-X-Technologien bestehen weitere Möglichkeiten technologischer Synergieeffekte. Ein oft diskutiertes Thema stellt dabei die Kopplung von Strom- und Verkehrssektor auf Basis der sich entwickelnden E-Mobilität dar. Dabei werden die in E-Autos vorhandenen Stromspeicher als wertvolles Potential für eine dezent-

¹¹⁴ SEFEP (2012), „Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität“.

¹¹⁵ HYPOS-Projekt: LocalHY (2017), http://www.hypos-eastgermany.de/fileadmin/content/content/Projektposter/LocalHy_Projektposter.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

¹¹⁶ Kumatec GmbH (2017) <http://www.kumatec.com/aktuell/iq-innovationspreis-mitteldeutschland-2016/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹¹⁷ HYPOS e.V. Mitgliederliste (2017), <http://www.hypos-eastgermany.de/das-wasserstoffkonsortium/hypos-mitglieder/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹¹⁸ TMUEN (2017) <https://www.thueringen.de/th8/tmuen/energie/speicher/index.aspx> (Zugriff: 29.08.2018).

¹¹⁹ MUW Screentec GmbH (2017), <http://www.muw-erfurt.de/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹²⁰ Modulares Wasserstoffkraftwerk (2017), <http://www.lohc-kraftwerk.de/start/> (Zugriff: 29.08.2018).

rale, netzdienliche Stromspeicherung gesehen. Durch eine intelligente Regel- und Steuertechnik könnte der Speicher eines jeden E-Autos einen Beitrag zum Abfangen von Einspeise- und Lastspitzen im Stromnetz leisten, solange das entsprechende E-Auto an einer Ladestation angeschlossen ist. Da ein PKW im Durchschnitt 23 Stunden am Tag steht, ist hier ein großes Speicherpotential vorhanden.¹²¹ Während dieses Konzept technologisch vielversprechend ist, bleiben jedoch bei der bisherigen Diskussion einige Fragen offen. Beispielsweise sind bisher keine hinreichenden Untersuchungen bekannt, welche sich der Frage nach dem dadurch entstehenden Zusatzverschleiß und den Zusatzkosten für den Endverbraucher widmen. Eine starke Einbindung von Elektrofahrzeugen in das öffentliche Stromnetz würde eine nicht zu vernachlässigende, zusätzliche Zyklusbelastung der eingesetzten Speichertechnologie im E-Auto zur Folge haben. Bei derzeit eingesetzten Batterietechnologien zieht ein solch häufiges Laden und Entladen einen zusätzlichen Verschleiß der Batterie nach sich, der wiederum eine massive Verkürzung der Lebensdauer für die primäre Anwendung – das Fahren – zur Folge haben könnte. Die Einbindung von E-Fahrzeugen in und die Nutzung für das öffentliche Stromnetz könnte demnach ohne entsprechende rechtliche Regelungen eine möglicherweise erhebliche Zusatzbelastung des Endverbrauchers bedeuten, welche nicht vernachlässigt werden sollte. Auch andere Technologien bieten bisher noch unerforschtes Potential. Zum Beispiel bieten einige Strom- und Wärmespeichertechnologien bisher wenig erforschte Kopplungsmöglichkeiten. Insbesondere Redox-Flow-Batterien, in denen große Mengen an Flüssigkeiten vorhanden sind, bieten möglicherweise Potentiale zur gleichzeitigen Speicherung von Strom und (sensibler) Wärme. Aber auch die Nutzung von Abwärme in einer

Vielzahl von Prozessen in privaten Haushalten, Gewerbe und Industrie kann weiter vorangetrieben werden. Insgesamt erscheint es für eine erfolgreiche Energiewende sinnvoll die bisher im Forschungs- und Entwicklungsstadium befindlichen Speichermöglichkeiten weniger als konkurrierende, sondern vielmehr als sich ergänzende Technologien zu betrachten. So können Synergieeffekte entdeckt und zielgerichtet erforscht werden.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten: In Thüringen hat sich in den vergangenen Jahren die TU Ilmenau mit dem Projekt „Gesteuertes Laden“ mit den technischen Herausforderungen bei der Nutzung von E-Autos als dezentrale, netzdienliche Speicher beschäftigt.¹²² Weiterhin ist Thüringen mit einigen Vertretern aus der Wirtschaft im Verbundprojekt „WindNODE“ der neuen Bundesländer vertreten.^{123,124} Dieses Projekt hat zum Ziel Nordostdeutschland bis November 2020 zu einer Modell-/Schaufensterregion für ein Gesamtkonzept zur Integration erneuerbarer Energien ins Stromnetz auszubauen. Hierbei soll auch die Einbindung von Speicherkonzepten eine Rolle spielen.

3.6 Technische Evaluation von Speichertechnologien

In diesem Abschnitt werden konkrete technische Parameter der Speichertechnologien innerhalb des Strom- und Wärmesektors miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Eigenschaften bewertet. Dazu werden zunächst technische Kriterien skizziert, die dann in einem zweiten Schritt dazu dienen, den technologischen Reifegrad der Speicher zu bestimmen.

3.6.1 Speicher im Stromsektor

Die verfügbaren Technologien für Stromspeicher unterscheiden sich hinsichtlich der in Tabelle 3.1 dargestellten technischen Parameter zum Teil erheblich. Während

¹²¹ Mobility House GmbH (2017), https://www.mobilityhouse.com/de_de/vehicle-to-grid (Zugriff: 29.08.2018).

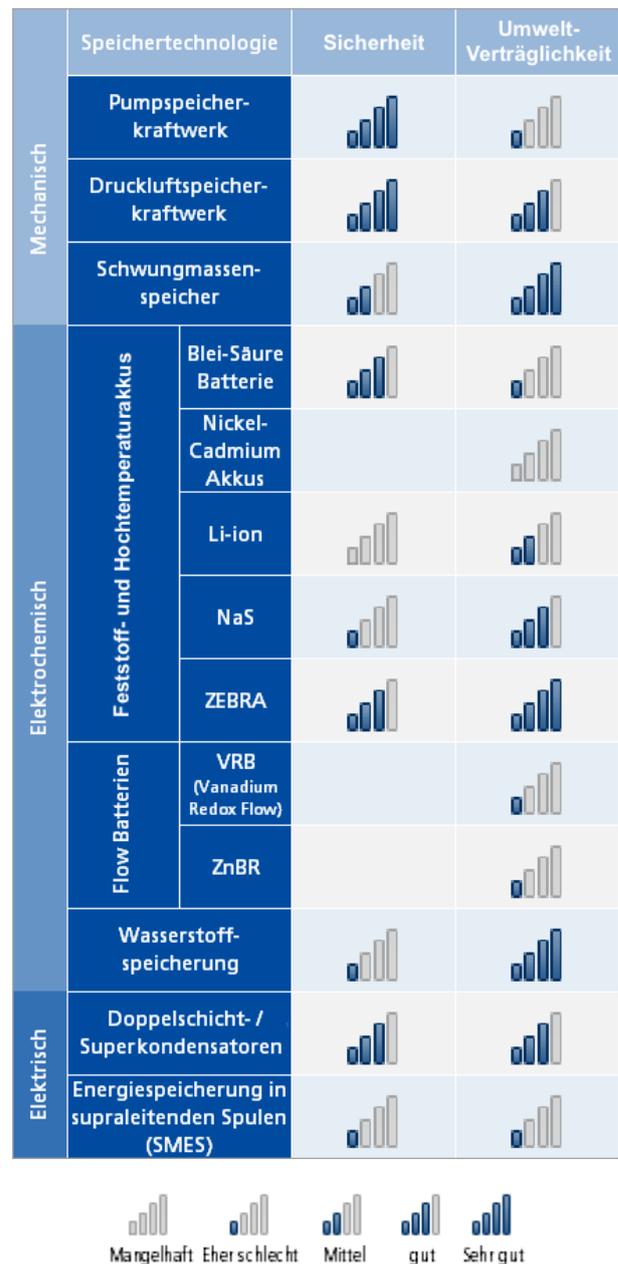
¹²² TU Ilmenau (2017), <https://www.tu-ilmenau.de/ees-eev/forschung/vertikaler-netzbetrieb/gesteuertes-laden/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹²³ WindNODE-Projektwebsite, <http://www.windnode.de/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹²⁴ EnArgus Informationsdienst (2017), https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&id=24576863&v=10&p=2&d=place_facet_enargus_ort_st/Th%c3%bcringen&q=speicher (Zugriff: 29.08.2018).

manche Technologien eine hohe spezifische Energie aufweisen (z. B. Wasserstoff, Lithium-Ionen-Batterien, Natrium-Schwefel- und Natrium-Nickelchlorid-Batterien) verfügen andere Speicher nur über sehr geringe spezifische Energien (z. B. Druckluft, Doppelschichtkondensatoren). Auch hinsichtlich der potenziell bereitgestellten Energiemenge existieren deutliche Unterschiede zwischen den Technologien, was grundsätzlich andere Anwendungen auf Netzebene impliziert. Aufgrund der Größe von Pumpspeicherkraftwerken kann deren Speicherkapazität auf Ebene der Hochspannungsebene eingesetzt werden, während Akkumulatoren wie Blei-Säure- oder Lithium-Ionen-Batterien höchstens auf Ebene von Niederspannungsnetzen systemstabilisierend wirken können. Auch die Entladetiefe ist ein wichtiger Faktor zur Bestimmung der energetischen Qualität. Sie bezeichnet die Menge an entladener Energie im Vergleich zur gesamten Speicherkapazität in Prozent und determiniert somit die Performance eines Speichers erheblich. Bei Redox-Flow- und Natrium-Schwefel-Batterien stellen sich fast keine Verluste ein, während bspw. Druckluftspeicher eine Entladetiefe von unter 50% aufweisen. In Bezug auf die Zyklenlebensdauer ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen den Technologien: Während Akkumulatoren in der Regel eine Zyklenlebensdauer im niedrigen Tausenderbereich aufweisen (mit Ausnahme von Lithium-Ionen-Batterien) können z. B. Doppelschichtkondensatoren über 500.000 Mal und Schwungradspeicher bis zu 80.000 Mal be- und entladen werden ehe sie als Speicher unbrauchbar werden. Hinsichtlich der kalendarischen Lebensdauer schneidet die älteste Technologie am besten ab. Pumpspeicherkraftwerke haben eine Betriebsdauer von bis zu 80 Jahren, während beispielsweise Redox-Flow-Batterien etwa 10 bis 20 Jahre lang betrieben werden können. Neben rein technischen Parametern sind in der Bewertung von Speichertechnologien ebenso Faktoren wie Sicherheit und Umweltverträglichkeit miteinzubeziehen. Diese hängen direkt mit den eingesetzten Rohstoffen zusam-

Abbildung 3.4. Sicherheits- und Umweltaspekte von Speichertechnologien.



Quelle: Eigene Darstellung (EuPD Research)¹¹⁴

men und werden deshalb unter den technischen Determinanten subsumiert. In Abbildung 3.4 werden Speichertechnologien hinsichtlich der Kriterien Sicherheit und Umweltverträglichkeit bewertet.

Pumpspeicherkraftwerke zeichnen sich durch eine hohe Betriebssicherheit aus und generieren dabei keine CO₂-Emissionen. In Bezug auf die Umweltverträglichkeit schneiden Pumpspeicherkraftwerke jedoch relativ

schlecht ab, da deren Errichtung mit erheblichen Eingriffen in Landschaft und Natur verbunden ist.¹²⁵ Im Vergleich zu anderen Technologien ist deren Flächenbedarf groß. Druckluftspeicher weisen aufgrund des Mediums Luft kaum Gefahren für Sicherheit und Umwelt auf. Lager von Schwungmassenspeicher können unter Umständen brechen, so dass in unmittelbarer Nähe eine Gefahr ausgeht.¹²⁶ Blei-Säure-Batterien hingegen besitzen aufgrund des verwendeten Bleis nur eine geringe Umweltverträglichkeit.¹²⁷ Nickel-Cadmium-Batterien sind mittlerweile wegen ihrer Umwelt- und Gesundheitsschädlichkeit in den meisten Anwendungen verboten und wurden technisch durch Nickel-Metallhydrid-Batterien abgelöst.¹²⁸ Lithiumvorkommen sind knapp und die ökologischen Folgen beim Abbau des Metalls regional zum Teil erheblich. Hinsichtlich des Sicherheitsaspekts sind Lithium-Ionen-Batterien aufgrund ihrer Explosivität gefährlich.¹²⁹ Auch bei Natrium-Schwefel-Batterien gab es Fälle, bei denen die Batterien Feuer gefangen haben.¹³⁰ Flow-Batterien mit Vanadium oder Brom sind aufgrund ihres Säuregehalts bzw. ihrer Giftigkeit mit Gefahren für die Umwelt verbunden.¹³¹ In Verbindung mit Luft entsteht aus Wasserstoff hochexplosives Knallgas.¹³² Während Doppelschichtkondensatoren hinsichtlich beider Kriterien gut abschneiden, können die Magnetfelder supraleitender Spulen gesundheitliche Folgen für Menschen bewirken. In Abbildung 3.5 ist die Verortung der verschiedenen Stromspeichertechnologien hinsichtlich ihrer möglichen installierten Leistung (x-Achse) und ihre Entladezeit (y-Achse) dargestellt. Während Akkumulator

ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten bieten, sind mechanische und elektrische Speicherformen auf bestimmte Anwendungsbereiche beschränkt. So sind Pumpspeicherkraftwerke in der Lage, sehr große Mengen Strom zu speichern, benötigen aber mindestens 4 Stunden bis der gespeicherte Strom wieder entladen werden kann.¹³³ Eine Speicherung über längere Zeiträume ist dabei auch möglich. Im Gegensatz hierzu können supraleitende Spulen Strom nur bis zu 30 Minuten speichern, wobei ihre Leistung mit 100 MW aber relativ hoch ist.¹³⁴ Auch Druckluftspeicher verfügen mit bis 300 MW über eine große Leistung und eignen sich analog den Pumpspeicherkraftwerken zur Stromspeicherung über einen längeren Zeitraum.¹³³ Die gespeicherte Strommenge von Wasserstoff beläuft sich maximal auf 50 MW bei variablen Entladezeiten.¹³⁵ Akkumulatoren können sowohl größere Strommengen speichern (bis 50 MW Blei-Säure- und Natrium-Schwefel-Batterien) als auch kleinere Strommengen über einen Zeitraum zur Verfügung stellen. Genauso variieren die Entladezeit von wenigen Stunden bis zu einigen Tagen.

3.6.2 Speicher im Wärmesektor

In Hinblick auf Wärmespeicher weisen thermochemische Speicher mit 120 bis 250 kWh/m³ die höchste Energiedichte auf. Sensible Speicher liegen mit maximal 60 kWh/m³ weit darunter. Latente Speicher erreichen höchstens 120 kWh/m³. Bzgl. des Speichermediums bestehen zentrale Unterschiede darin, dass bei sensiblen Speichern Materialien wie Wasser und Beton verwendet

¹²⁵ Strölin (2012) Energiewirtschaftliche Einordnung und Bewertung einer Erweiterung des Pumpspeicherkraftwerkes Glems der EnBW Kraftwerke AG.

¹²⁶ Deutscher Bundestag (2008), <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/16/101/1610176.pdf> (Zugriff: 29.08.2018).

¹²⁷ SEFEP (2012), „Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität“.

¹²⁸ BTU Cottbus (2011), http://oderspree2020.dielinke-brandenburg.de/fileadmin/los/oderspree2020/pdf/studie_integration_erneuerbare-energien.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

¹²⁹ Fraunhofer ISE et al. (2009), „Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie“.

¹³⁰ SEFEP (2012), „Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität“.

¹³¹ FAZ (2013), <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/umwelt-technik/lithium-ionen-batterien-feueran-bord-12031765.html> (Zugriff: 29.08.2018).

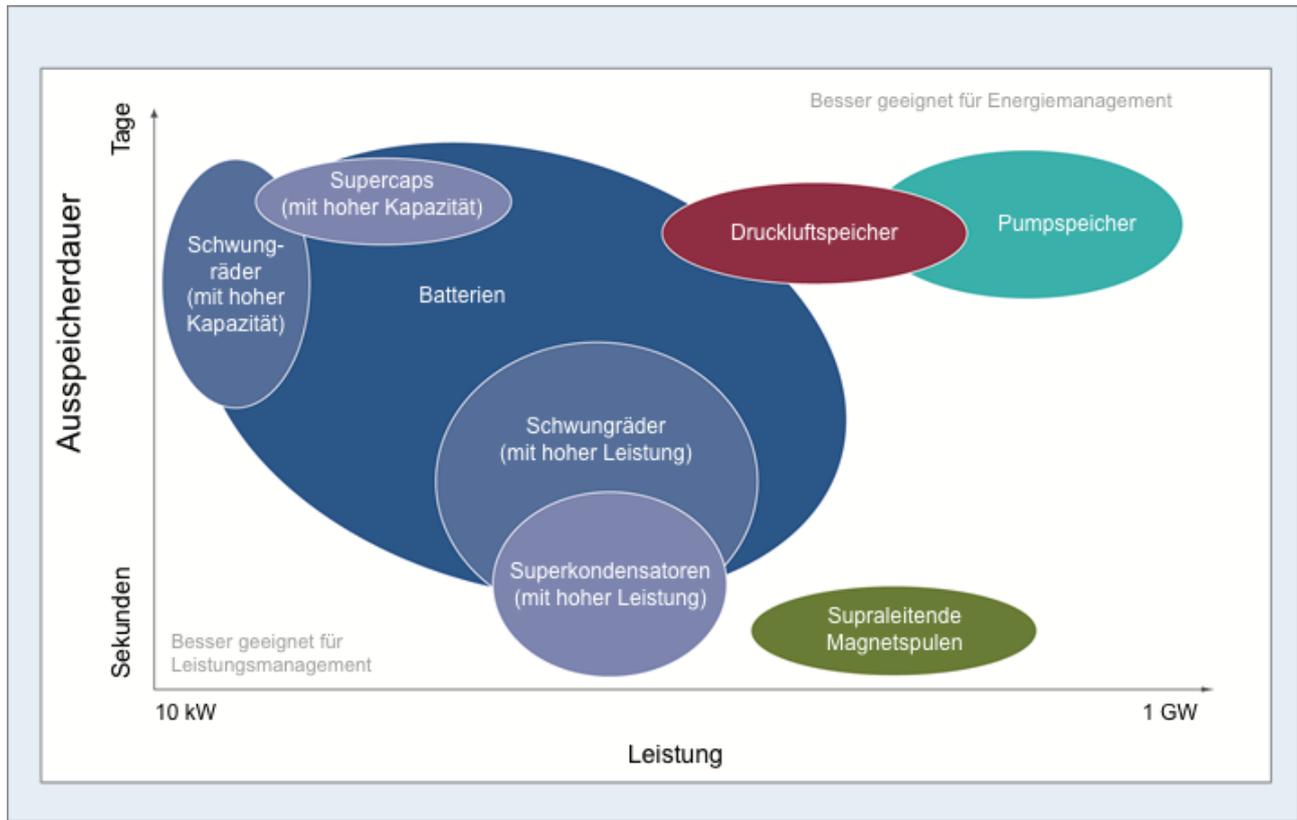
¹³² AEE (2012), https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/382.75_Renews_Spezial_Strom_speichern_Dez2014_online.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

¹³³ University of Limerick (2007), <http://www.iwea.com/index.cfm/page/technologicaldevelopments?twfld=42&download=true>

¹³⁴ Mauch et al. (2009), Anforderungen an elektrische Energiespeicher. (F. f. e.V., Hrsg.) München.

¹³⁵ EU Kommission (2011).

Abbildung 3.5. Verortung der Energiespeichertechnologien des Stromsektors gemäß ihrer Leistung und Ausspeicherdauer.



Quelle: EIA (2012, übersetzt ins Deutsche)

werden können. Diese Materialien sind relativ kostengünstig und unproblematisch hinsichtlich der Umweltverträglichkeit. Dies stellt wesentliche Vorteile dar. Die Arbeitstemperatur unterscheidet sich auch innerhalb der Speichertypen je nach Speichermedium. Während bei sensiblen Speichern, die mit Wasser arbeiten, die Arbeitstemperatur bei unter 100 °C liegt, kann sie bei der Verwendung bei Beton bis zu 500 °C betragen. Latente Speicher weisen generell eine geringere Arbeitstemperatur auf (in Abhängigkeit vom Speichermedium zwischen 10 und 80 °C).

Der Wirkungsgrad liegt bei sensiblen Speichern zwischen 50 und 90%, was eine relativ große Spannweite ist. Bei latenten Speichern wird eine Effizienz von 75 bis 90% erreicht, bei thermochemischen Speichern sogar 80

bis 100%. Sensible und latente Speicher können etwa 5.000 Zyklen leisten, thermochemische Speicher hingegen nur etwa 3.500.¹³⁶

3.7 Ökonomische Evaluation

Im Folgenden wird anhand der Kostenfaktoren, dem technologischen Reifegrad (Tabelle 3.2) und einer Wirtschaftlichkeitsanalyse eine Evaluation der Speichertechnologien im Strom- und Wärmesektor vorgenommen.

3.7.1 Kostenfaktoren

3.7.1.1 Kostenfaktoren im Stromsektor

Die Investitionskosten verschiedener Stromspeicher variieren zum Teil erheblich. Bezogen auf die Kosten für die Installation eines Kilowatts (kW) weisen Pumpspeicher-

¹³⁶ BINE Informationsdienst (2013).

kraftwerke die größte Spanne auf, da die Errichtung eines derartigen Speichers unterschiedlich aufwändig ausfallen kann. Baukosten von Speicherseen und somit die kapazitätsabhängigen Kosten eines Pumpspeicherkraftwerks hängen stark von den benötigten Dammvolumina der Speicherbecken ab.¹³⁷ Ferner beinhaltet die Bandbreite der Investitionskosten unterirdische und oberirdische Pumpspeicherkraftwerke, die ebenso mit unterschiedlich hohen Investitionskosten pro kW verbunden sind. Auch Lithium-Ionen-Batterien variieren sehr stark hinsichtlich der Kosten. Dies hängt mit den verschiedenen Materialien zusammen, die in einer Lithium-Ionen-Batterie eingesetzt werden können. Bei der Wasserstoffspeicherung variieren die Investitionskosten ebenfalls. Sie werden aber typischerweise folgendermaßen angegeben: „Für die Errichtung von unterirdischen Wasserstoff-Speicherkavernen fällt ein fixer Sockelbetrag von rund 10 Mio. EUR pro Kaverne an. Dazu kommen Kosten von ca. 20 EUR pro m³ Speichervolumen.“¹³⁷ Zudem müssen bei der Errichtung eines Wasserstoffspeichers auch Investitionen in die Rückverstromungsanlage berücksichtigt werden. Es zeigt sich also, dass die Investitionskosten oftmals von mehreren Faktoren abhängen können. Dennoch können die Kosten von anderen Speichertechnologien relativ eindeutig bestimmt werden. Mit rund 5% der Investitionskosten sind die Wartungskosten von Redox-Flow-Batterien besonders hoch. Grund dafür sind Leckagen, die durch die säurehaltige Flüssigkeit verursacht werden.¹³⁸ Auch bei supraleitenden Spulen ist ein höherer Wartungsaufwand nötig, da die nötigen Kältemaschinen störanfällig sind.¹³⁹ Blei-Säure-Batterien weisen ebenfalls relativ hohe Wartungskosten auf. Im Gegensatz dazu sind die Wartungskosten für Schwungmassenspeicher und Doppelschicht-

kondensatoren sehr gering.¹⁴⁰

3.7.1.2 Kostenfaktoren im Wärmesektor

Zur Bewertung der Kostenfaktoren eignet sich die Betrachtung der Kosten je installierter kWh. Sensible Speicher weisen dabei die höchste Kosteneffizienz auf, was an der hohen Skalierbarkeit liegt. So können sensible Speicher über bis zu 100 MWh Kapazität verfügen. Die Kosten liegen dabei zwischen 0,09 und 12,17 €/kWh. Bei latenten Speichern hingegen variieren die Kosten zwischen 12,17 und 60,87 €/kWh – in Abhängigkeit von der Größe und des Speichermediums. Die größten maximalen Kosten je kWh weisen thermochemische Speicher mit 9,36 und 121,73 €/kWh auf, was zum einen auf die vergleichsweise geringere Kapazität (max. 10 MWh) und zum anderen auf die höheren Kosten für die Speichermedien zurückzuführen ist.¹⁴¹

3.7.2 Technologischer Reifegrad

3.7.2.1 Technologischer Reifegrad: Stromspeicher

Die Entwicklung von Stromspeichern ist äußerst aufwendig und es dauert in der Regel Jahre bis eine Technologie kommerziell verfügbar wird. Ferner ist es ein Bereich, in dem weiterhin großes Potenzial für die Erforschung und Entwicklung neuer Speicherlösungen besteht, deren Anwendungsspektrum heute nur schwer abzuschätzen ist. Darüber hinaus werden heute bereits verfügbare Technologien weiterentwickelt. Verschiedene Speichertechnologien befinden sich derzeit in der Entwicklungs- oder/und Demonstrationsphase, die als Vorstufe zur kommerziellen Markteinführung eine entscheidende Rolle einnimmt. Bestes Beispiel hierfür ist die Wasserstoffspeicherung, deren Wirkungsgrad derzeit mit 40% jedoch gering ist. Diese Technologie wird momentan er-

¹³⁷ zfes (2012), http://www.zfes.uni-stuttgart.de/deutsch/downloads/20120727_Final_Stromspeicherpotenziale_fuer_Deutschland-.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

¹³⁸ SEFEP (2012), „Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität“.

¹³⁹ Fraunhofer ISE et al. (2009), „Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie“.

¹⁴⁰ AEE (2012), https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/382.75_Renews_Spezial_Strom_speichern_Dez2014_online.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁴¹ BINE Informationssystem (2013).

Tabelle 3.3. TRL-Stufen einzelner Energiespeicher-technologien im Strom- und Wärmesektor.

TRL	Technologien
Speicher im Stromsektor	
9	Pumpspeicherkraftwerke
7	Druckluftspeicherkraftwerke
9	Schwungmassenspeicher
9	Blei-Säure
9	Nickel-Cadmium, Nickel-Metallhydrid
9	Lithium-Ionen
7	Natrium-Schwefel
7	Natrium-Nickelchlorid-Zelle
6	Vanadium-Redox-Flow
7	Zink-Brom
5	Wasserstoff
6	Doppelschichtkondensatoren
6	Supraleitende Spulen
Speicher im Wärmesektor	
9	Sensible Speicher
7	Latente Speicher
4	Thermochemische Speicher

Quelle: EuPD Research (2017)

probt, ist aber von einer kommerziellen Nutzung noch entfernt. Im Jahr 2011 wurde eine erste Pilotanlage auf Wasserstoff-Hybridbasis in Prenzlau errichtet, die in der Lage ist, die fluktuierende Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik zu speichern und somit grundlastfähig zu machen.¹⁴² 2016 wurde bekanntgegeben, dass in Brandenburg ein Wasserstoffspeicher errichtet werden soll. Wissenschaftler der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg begleiten

das Projekt. Insbesondere geht es ihnen um Tests von neuen Speichermöglichkeiten für Wasserstoff und die Optimierung der Elektrolyseure. Zum Konsortium gehören unter anderem Enertrag und Vattenfall. McPhy Energy Deutschland liefert Elektrolyseure und Wasserstoffspeicher. Wann der Bau beginnt, steht allerdings noch nicht fest.¹⁴³ Während sich elektrische Speicher wie Superkondensatoren und supraleitende Spulen noch in einer frühen Kommerzialisierungsphase befinden, sind elektrochemische Speicher wie NaS-Batterien bereits kommerziell verfügbar. Im Segment der Druckluftspeicher sind weltweit zwei Anlagen in Betrieb (in McIntosh, USA und Huntorf, Niedersachsen). Das Projekt ADELE, das eigentlich bis 2015 realisiert werden sollte, wurde im Frühjahr 2015 durch RWE aufgrund fehlender Marktperspektive eingestellt. Pumpspeicherkraftwerke hingegen haben aufgrund ihrer langjährigen Anwendung Marktreife erlangt. Insgesamt sind derzeit 33 Pumpspeicherkraftwerke mit einer Leistung von rund 7 GW und einer Kapazität von 40 GWh in Deutschland in Betrieb. Die TRL-Stufen einzelner Stromspeichertechnologien sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

3.7.2.2 Technologischer Reifegrad: Wärmespeicher

Die sensible Wärmespeicherung ist bis zum heutigen Tag das am weitesten erforschte und am häufigsten angewendete thermische Speicherverfahren. Dabei reichen die Möglichkeiten vom dezentralen Einsatz in Wohnungen bis zu zentralen Speichersystemen für Einzelgebäude und ganze Wohngebiete.¹⁴⁴ Vor diesem Hintergrund werden sensible Speicher auf der TRL-Skala auf Stufe 9 einsortiert. In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Untersuchungen zur Entwicklung und Verbesserung von Latentwärmespeichermaterialien auf Basis von Paraffinen und Salzhydraten durchgeführt. Insbe-

¹⁴² Topagrar.de (2011), <http://www.topagrar.com/news/Energie-News-Wasserstoff-Hybridkraftwerk-geht-in-Prenzlau-ans-Netz-579849.html>. (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁴³ WirtschaftsWoche (2016), <http://www.wiwo.de/technologie/green/tech/sonne-wind-und-wasserstoff-vielseitiges-hybridkraftwerk-in-brandenburg-geplant/13607990.html> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁴⁴ Cluster Thüringen (2010).

sondere die Erforschung mikroverkapselter PCM war ein entscheidender Schritt für die Entwicklung kommerzieller Produkte. Salzhydrate besitzen gegenüber Paraffinen eine höhere Dichte und daher eine höhere volumenbezogene Energiedichte, lassen sich jedoch bis noch nicht in Mikrokapseln einbinden. Die Verarbeitung erfolgt in Folienbeuteln oder Makrokapseln aus Kunststoff. Salzhydrate besitzen zudem eine höhere Schmelzenthalpie als Paraffine und sind nicht entflammbar. Aus diesem Grund sind Forschungen auf diesem Gebiet von hohem Interesse. Für beide genannten Klassen von PCM kommt hinzu, dass die Materialkosten weiter gesenkt und die effektiven Energiedichten gleichzeitig erhöht werden müssen, um eine kommerzielle Anwendung zu erreichen. Des Weiteren bestehen Probleme hinsichtlich Unterkühlung und Phasenseparation, die noch nicht gelöst sind und demnach Forschungsbedarf besteht. Ein weiterer Nachteil ist (noch), dass beide Stoffklassen eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen, die für eine effiziente Anwendung nicht förderlich ist, zudem ist in Feststoffen grundsätzlich der konvektive Wärmetransportweg ausgeschlossen. Daher muss die Dimensionierung der Wärmeübertrager zur Be- und Entladung von PCM weit größer als bei sensiblen flüssigen Speichermedien sein. Einen Ausweg bietet die Entwicklung von Verbundmaterialien zur Kombination der Wärmetransport- und der Wärmespeichereigenschaften. Die Entwicklung von PCM für den Hochtemperaturbereich befindet sich noch in der Versuchs- und Testphase. Durch den geplanten Ausbau solarthermischer Kraftwerke wird diesen Produkten zukünftig steigendes Potenzial zugerechnet. Zudem ermöglichen diese Technologien, dass dezentrale Abwärme aus der Industrie oder von Kondensationskraftwerken mobil genutzt werden kann. Pufferspeicher für eine Effizienzsteigerung von Heizungs- und Klimatisierungssystemen in Gebäuden sind sowohl mit Paraffinen als auch Salzhydraten bereits kommerziell erhältlich. Aufgrund der hohen Kosten, u. a. auch durch die

größer dimensionierten Wärmeübertrager, der fehlenden Langzeiterfahrungen und des großen Bruttovolumens stellen allerdings herkömmliche sensible Warmwasserspeicher nach wie vor die sinnvollere Alternative dar. Die aktive Wärmespeicherung mittels PCM-Bauteilen und PCM-Produkten, die durch Kaltwasser und -luft zur Kristallisation gebracht werden, befinden sich gerade auf dem Weg von einzelnen Pilotprojekten zur Marktreife. Ob dieser Weg wirtschaftlich sein wird, ist zum heutigen Zeitpunkt nicht vorhersehbar. Die relativ geringe Marktreife mit Forschungsbedarfen auf unterschiedlichen Ebenen zeigen, dass zwar die Technologie und die Komponenten bestehen, in der Umsetzung aber noch Aspekte untersucht und optimiert werden müssen, um eine kommerzielle Anwendung zu ermöglichen. Aus diesem Grund werden latente Wärmespeicher der TRL-Stufe 7 zugeordnet.

Die thermochemische Wärmespeicherung bietet die theoretisch höchste Wärmespeicherdichte der unterschiedlichen Speicherformen und zudem die Möglichkeit einer nahezu verlustfreien Energiespeicherung bei Getrenntlagerung der energiereichen Reaktionspartner. Jedoch befinden sich Materialentwicklung und Systemintegration noch im Anfangs- bzw. Laborstadium. Es konnten v.a. mit Zeolith und Silikagel einige wenige Pilotprojekte und Versuchsspeicher realisiert werden, wobei die theoretisch möglichen Speicherdichten nicht erreicht wurden. Der derzeitige Forschungsstand fokussiert sich auf die Entwicklung leistungsfähiger, preiswerter und zyklenstabiler Materialien. Aufgrund der schlechten Wärmeleitung der bisher untersuchten Materialien müssen neue Konzepte für Wärmetauscher bzw. Speicher entwickelt werden, um die entstandenen Sorptionswärmen möglichst schnell abzuführen. Da bei dieser Speicherform die verfahrenstechnische Einbindung in die Gebäudetechnik ebenfalls sehr aufwändig ist, besteht hier ein sehr hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Für thermochemische Speicher besteht im

Vergleich zu den anderen Technologien der höchste Forschungsbedarf. Da erst wenige Pilotprojekte umgesetzt werden konnten, werden thermochemische Speicher auf die TRL-Stufe 4 gesetzt. Die TRL-Stufen einzelner Wärmespeichertechnologien sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

3.7.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

3.7.3.1 Bestimmung von Marktpotenzialen im Stromsektor

Das nachfolgende Kapitel widmet sich der Wirtschaftlichkeitsanalyse verschiedener Speichertechnologien. Zur Umsetzung dieser Analyse findet das sogenannte Konzept der Levelized Costs of Storage (LCOS) Anwendung.

Im Rahmen der Kalkulation der Stromspeichererzeugungskosten (LCOS) werden sämtliche Kosten, die zwischen Anlageninstallation und dem Nutzungsende entstehen berücksichtigt. Der Ansatz basiert auf der Berechnungsvorschrift der Levelized Costs of Electricity (LCOE) und behandelt Zahlungsströme gleichartig zur Energieerzeugung bzw. Speicherung, so dass diese entsprechend auf das Installationsjahr abdiskontiert werden.¹⁴⁵ Für die Inflationsrate wird ein Wert von 2 % und für die Abzinsungsrate (Diskontfaktor) analog zum langfristigen Diskontsatz ein Wert von 4 % verwendet.¹⁴⁶

Als Vergleichsbasis der verschiedenen Technologien steht die Grundannahme eines vollen Ladezyklus pro Tag, unabhängig von der jeweiligen Speichertechnologie. Demgemäß wird in den folgenden Berechnungen einheitlich von 365 Vollzyklen pro Jahr bei jeder Speicherlösung ausgegangen. Die installierte Leistung (L) beträgt für alle Technologien ein Kilowatt, worauf sich entsprechend die Investitionskosten (I) beziehen. Die Kalkula-

tion der jährlich gespeicherten Strommenge basiert folglich auf Entladetiefe (DoD), Wirkungsgrad (E_{el}) und der Zyklenzahl pro Jahr (Z). Die als Jahresbetrag ausgewiesenen Betriebskosten (OM) sowie die gespeicherte Strommenge pro Jahr gehen als Summe über die gesamte Betriebsdauer (n) in die Berechnung ein. Die nachstehende Formel fasst die Berechnung der Stromspeicherungskosten (LCOS) zusammen:¹⁴⁶

$$LCOS = \frac{I + \sum_{t=1}^n \frac{OM \times (1+i)^t}{(1+d)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{L \times DoD \times E_{el} \times Z}{(1+d)^t}}$$

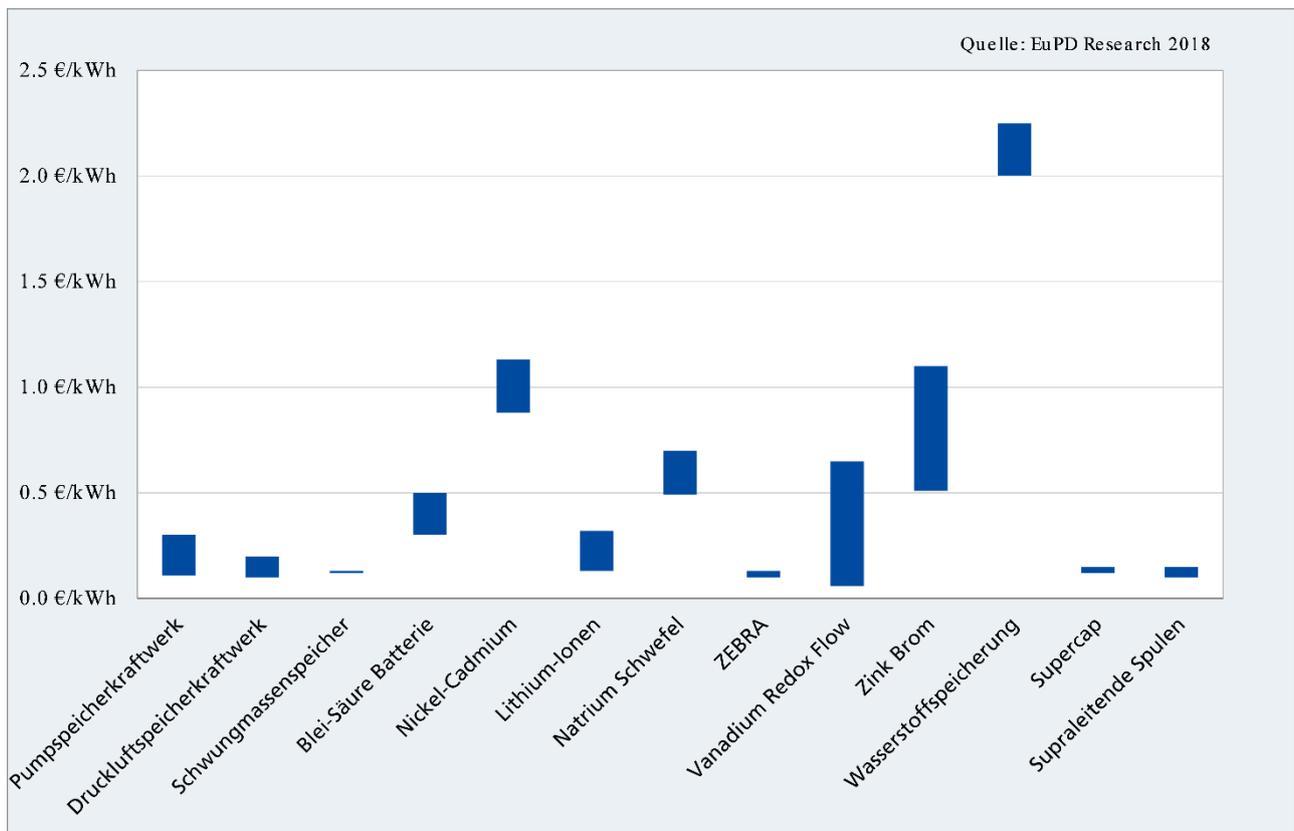
I: Investitionskosten	DoD: Entladetiefe
n: Lebensdauer	OM: Betriebskosten
E_{el} : Wirkungsgrad	t: Betriebszeit
Z: Zyklenzahl pro Jahr	i: Inflation
d: Diskontierungsrate	L: Installierte Leistung

Aufgrund der Tatsache, dass die Höhe der Investitionskosten für Speichertechnologien von verschiedenen Einflussfaktoren abhängt und somit stärker variieren kann, zeigen die nachfolgenden Berechnungen eine Bandbreite an LCOS. Die Speicherkosten in Abbildung 3.6 beziehen sich auf neu zu installierende Speicherkapazitäten.

Mit den höchsten Stromspeichererzeugungskosten zeigt sich die Wasserstoffspeicherung (Power to Gas-Technologie) mit einem Maximalwert von 2,24 Euro je kWh. Die hierbei angelegten Investitionskosten von etwa 1.000 Euro pro Kilowatt fallen jedoch in Relation zu anderen Technologien nicht übermäßig hoch aus. Ursächlich für die hohen Stromspeichererzeugungskosten der Wasserstoffspeicherung ist einerseits die geringe Entladetiefe von 50%.

¹⁴⁵ Campell, M. (2008), <http://www.sunpower.com/sites/sunpower/files/media-library/white-papers/wp-levelized-cost-drivers-electricity-utility-scale-photovoltaics.pdf> (Zugriff: 18.09.2018)

¹⁴⁶ Ammon, M. et al. (2015): „Studie zur Optimierung des Gesamtsystems der Flexibilitätsoptionen im Energiesektor in Sachsen-Anhalt unter besonderer Berücksichtigung von Speichern“

Abbildung 3.6. Speicherkosten (LCOS) neu zu installierender Speicher verschiedener Technologien im Stromsektor.

Quelle: Eigene Darstellung (EuPD Research)

Andererseits liegt der Wirkungsgrad im Fall der Rückverstromung bislang bei lediglich 40%. Aktuelle Forschungen des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) lassen deutliche Fortschritte im Wirkungsgrad erkennen, so dass im Teilschritt der Umwandlung von elektrischer Energie in Methan der Wirkungsgrad von bislang etwa 54% auf 76% gesteigert werden konnte.¹⁴⁷

Die Gruppe der elektrischen Speichertechnologien erreicht gesamthin sehr niedrige Stromspeicherkosten. Dies fußt auf einerseits relativ geringen Investitionskosten. Andererseits liegen bei diesen Technologien sehr hohe Entladetiefen und Wirkungsgrade vor. Gegenwärtig sind Doppelschicht-Kondensatoren (Supercaps) noch

in einer Vorphase einer umfassenden Kommerzialisierung. Das Einsatzgebiet der Supercaps liegt in der Absicherung der Netzspannung.¹⁴⁸ Die Verwendung als Kurzzeitspeicher legt den größten Nachteil dieser Technologie offen und zwar die fehlende Einsatzoption als Langzeitspeicher.¹⁴⁹

Analog zu elektrischen Speichern besitzen mechanische Speichertechnologien relativ geringe Stromspeicherkosten. Aus der Gruppe der mechanischen Speicher stechen die Pumpspeicherkraftwerke besonderes hervor. Aufgrund sehr niedriger Investitionskosten ist hier die Stromspeicherung mit geringen Kosten von gerade einmal 0,08 Euro je kWh verbunden.¹⁵⁰ In der Anwendung

¹⁴⁷ Karlsruher Institut für Technologie, Presseinformation (Nr. 009) vom 05.02.2018, www.helmeth.eu (Zugriff: 18.09.2018)

¹⁴⁸ SEFEP (2012), „Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität“.

¹⁴⁹ DCTI (2013), „Speichertechnologien 2013 - Technologien, Anwendungsbereiche, Anbieter“.

¹⁵⁰ In der Literatur werden z.T. Stromspeicherkosten von 3-5 Cent je kWh für Pumpspeicherkraftwerke angegeben (zfes (2012)). Diese beziehen sich auf bestehende Kraftwerke, wobei in der Berechnung nur die Betriebskosten einbezogen werden. Ohne Investitionskosten kann für Pumpspeicher ein LCOS von 4,2 Cent je kWh ermittelt werden.

der Druckluftspeichertechnologie lassen sich ebenso geringe Stromspeichererhalten realisieren. Pumpspeicherkraftwerke besitzen weltweit eine starke Verbreitung. Die jahrzehntelange Anwendungserfahrung in Deutschland hat Pumpspeicherkraftwerke zur gegenwärtig wichtigsten Stromspeichertechnologie über längere Zeiträume werden lassen.¹⁴⁸ Dies manifestiert sich gleichermaßen im zukünftigen Ausbau dieser Technologie. Entsprechend sind bis 2020 zwölf neue Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland geplant.¹⁵¹

Im Segment der elektrochemischen Speichertechnologien sind Blei-Säure-Batterien als Starterbatterien im Automobilbereich seit Langem etabliert. Nachdem Blei-Säure-Batterien in 2013 und 2014 den Anwendungsbereich der Zwischenspeicherung von Solarstrom in privaten Haushalten dominierten, ist deren Anteil bis Ende 2017 auf nahezu null gesunken.¹⁵² Neben der geringen Entladetiefe ist die begrenzte Nutzungsdauer von etwa zehn Jahren der Hauptgrund für vergleichsweise hohe Stromspeichererhalten von Blei-Säure-Batterien im Bereich zwischen 30 und 50 Eurocent je Kilowattstunde.

Die vergangenen Jahre waren durch deutliche Kostenreduktionen für Lithium-Batterien gekennzeichnet, so dass moderne Lithium-Speicher mittlerweile niedrigere Stromspeichererhalten aufweisen als Blei-Akkumulatoren. Batterien auf Basis von Natrium-Schwefel-Lösungen weisen gegenwärtig noch vergleichsweise hohe Stromspeichererhalten auf. Im Kontext eines zunehmenden Anteils fluktuierender erneuerbarer Energien, werden für diese Speichertechnologien mit hoher Kapazität in der Speicherung von Strom aus Windparks oder Photovoltaikanlagen im Megawattbereich Anwendungsfälle gesehen.¹⁵³ Eine ähnliche Auslegung haben NaNiCl- Batte-

rien, denn sie sind ebenso für die Speicherung größerer Strommengen geeignet. Dabei verfügen sie mit 5 Cent je kWh über sehr geringe LCOS. Während Natrium-Nickelchlorid-Batterien im Bereich der mobilen Speicherlösungen bereits mehrfach erprobt wurden (z. B. in Bussen), finden derartige Systeme bislang nur in Spezialfällen Anwendung.¹⁵³ Stromspeichererhalten sind auch in Abhängigkeit der Anwendungsgebiete zu beurteilen. Exemplarisch stehen hier Nickel-Cadmium-Batterien mit einem LCOS von mindestens 0,86 Euro je kWh. Aufgrund ihrer speziellen Eignung zum Einsatz bei tiefen Umgebungstemperaturen relativiert sich der Kostennachteil in speziellen Anwendungsbereichen.¹⁵⁴ Im Fall von Redox-Flow-Batterien werden diese in der Stromspeicherung von größeren Wind- und Solarparks eingesetzt. Eines der neuesten Projekte wurde von Fraunhofer ICT im Projekt „RedoxWind“ in 2017 realisiert. Hierbei ist die Redox-Flow-Batterie mit einer Leistung von 2 MW und einer Kapazität von 20 MWh mit einem Windpark gekoppelt.¹⁵⁵ Weitere Anlagen werden zum Beispiel in Irland (Speicherkapazität von 12 MWh)¹⁵⁶ und Japan (6 MWh)¹⁵⁷ betrieben. Die Stromspeichererhalten dieser Technologie stehen stark in Abhängigkeit der Systemgröße. Folglich erreichen sehr große Redox-Flow-Speicher (120 MWh) äußerst geringe Stromspeichererhalten (bis zu 0,06 Euro je kWh). Demgegenüber sind die Investitionskosten in kleine Speichersysteme dieser Technologie für den häuslichen Bereich noch sehr hoch. Zudem liegt gegenwärtig noch ein relativ niedriger Wirkungsgrad von 75 % vor.

Gesamthin kann somit herausgestellt werden, dass die verschiedenen Speichertechnologien sich nicht nur hinsichtlich der Kosten, sondern auch der Anwendungsfel-

¹⁵¹ zfes (2012), http://www.zfes.uni-stuttgart.de/deutsch/downloads/20120727_Final_Stromspeicherpotenziale_fuer_Deutschland-.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁵² RWTH Aachen (2018), „Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0“, www.speichermonitoring.de

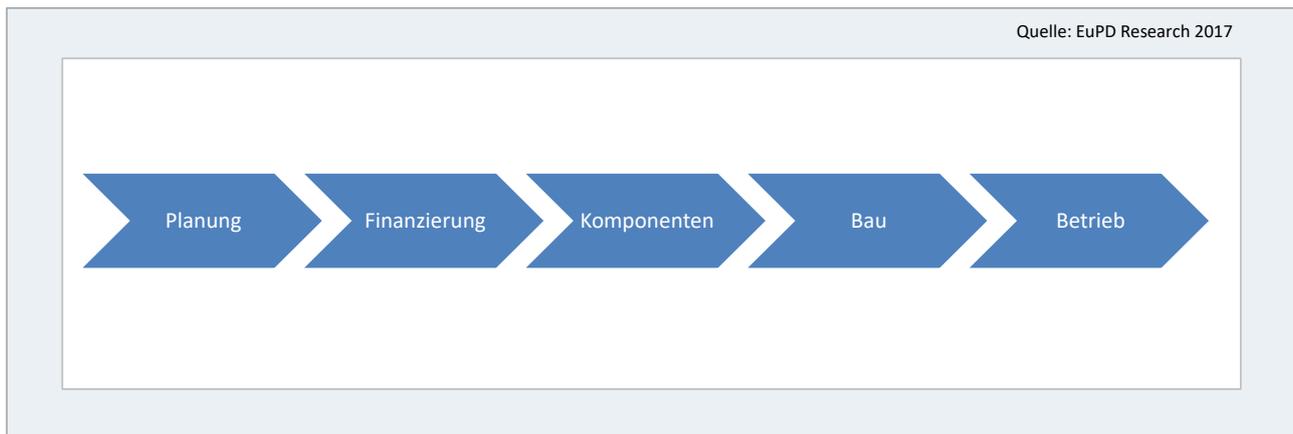
¹⁵³ Fraunhofer ISE et al. (2009), „Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie“.

¹⁵⁴ INT (2009), <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-89742.html> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁵⁵ Fraunhofer ICT (2017), <https://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/ae/RFBWind.html> (Zugriff: 18.09.2018)

¹⁵⁶ AEE (2012), https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/382.75_Renews_Spezial_Strom_speichern_Dez2014_online.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁵⁷ Mauch et al. (2009), „Anforderungen an elektrische Energiespeicher“. (F. f. e.V., Hrsg.) München.

Abbildung 3.7. Wertschöpfungskette bei Großprojekten im Stromsektor.

Quelle: Eigene Darstellung (EuPD Research)

der unterscheiden. Dies bedeutet, dass lediglich ein bedingter Wettbewerb zwischen den Technologien gesehen werden kann. Weitere technologische Entwicklungen werden hier auch zukünftig Kostenreduktionen erlauben und Speichertechnologien aus dem Forschungsstatus in die wirtschaftliche Anwendung bringen.¹⁵⁸

3.7.3.2 Bestimmung von Marktpotenzialen im Wärmesektor

Zur Evaluierung der Wirtschaftlichkeit wird – analog zu den Speichertechnologien im Stromsektor – auf das Konzept der Levelized Costs of Storage (LCOS) zurückgegriffen. Die Grundlage zur Evaluierung bilden dabei Berechnungen von BINE. Die derzeit höchsten Kosten der Wärmespeicherung werden mit einem oberen Wert von 4,68 €cent/kWh für die thermochemische Speicherung ermittelt. Hintergrund sind zum einen die relativ hohen Investitionskosten, zum anderen spielt auch die im Vergleich zu den anderen Technologien geringe Zyklenzahl eine Rolle. Auffällig sind zudem die geringen Kosten bei sensiblen Wärmespeichern mit etwa 0,01 €cent/kWh.

Latente Wärmespeicher liegen etwa bei 1,21 bis 5,62 €cent/kWh.¹⁵⁹

3.8 Wertschöpfungsketten

Zur späteren Identifikation relevanter Branchenakteure in Thüringen werden im nächsten Schritt die Wertschöpfungsketten des Strom- und Wärmesektors im Allgemeinen dargestellt. Dabei wird darauf Wert gelegt, neben den Herstellern auch die Zulieferer zu erfassen, um die Branche möglichst ganzheitlich abbilden zu können.¹⁶⁰

3.8.1 Wertschöpfungsketten im Stromsektor

Im Stromsektor werden zwei Wertschöpfungsketten definiert. In der ersten Kategorie werden Technologien erfasst, die hauptsächlich oder lediglich als Großprojekte umgesetzt werden. In der zweiten Kategorie werden die Wertschöpfungsketten von Technologien, die im Rahmen von Kleinprojekten zur Anwendung kommen, betrachtet.

¹⁵⁸ Ammon, M. et al. (2015): „Studie zur Optimierung des Gesamtsystems der Flexibilitäts Optionen im Energiesektor in Sachsen-Anhalt unter besonderer Berücksichtigung von Speichern“

¹⁵⁹ BINE Informationsdienst (2013).

¹⁶⁰ Dabei wird jedoch eine Beschränkung auf die Zulieferer vorgenommen, die einen signifikanten Anteil an der Branche haben. So werden bspw. Schraubenhersteller, die auch andere Branchen beliefern, nicht betrachtet.

Tabelle 3.4. Komponenten der Stromspeichertechnologien.

Technologie	Komponenten
Pumpspeicher	Turbine, Stahlwasserbau (Rohre, Verschlüsse etc.), Generatoren, Pumpen, Steuerungssoftware und –hardware, Elektrische Kraftwerks-ausrüstung (Transformator, Hochspannungsschaltanlage etc.), Mechanische Kraftwerksausrüstung (Drainagesystem, Entwässerungssystem etc.)
Druckluftspeicher	Kompressor, Motor / Generator, Turbine, Hochtemperaturverdichter/-expander, Kaverne
Schwungradspeicher	Rotor, Stator, Magnetlager, Schwungrad, Kugellager
Wasserstoffspeicher	Elektrolyseur, Druckbehälter / Kaverne, Verbrennungsturbine / Brennstoffzelle
Supraleitende Spulen	Supraleitende Spule, kryogenes Kühlsystem, Spulenschutz, Wechselrichter, Vakuumkammer

Quelle: EuPD Research (2017)

3.8.1.1 Großprojekte

Der Begriff Großprojekt wird hier grundsätzlich als Umsetzung im Rahmen einer Anwendung im MW-Bereich verstanden, d. h. der Speicher wird nicht durch einen Privathaushalt oder ein Unternehmen, sondern durch eine Betreibergesellschaft, einen Energieversorger oder eine Kommune betrieben. Abbildung 3.7 zeigt ein Schema der Wertschöpfungsketten bei Großprojekten, wie sie in der vorliegenden Studie verstanden werden. Dabei ist zentral, dass sich die Wertschöpfungsketten der einzelnen Technologien insbesondere auf Ebene der Komponenten, die zur Projektumsetzung benötigt werden, unterscheiden. Da Großprojekte individuell geplant und dafür entsprechend Komponenten hergestellt werden, ist der erste Schritt der Wertschöpfungskette die Planung, gefolgt von der Finanzierung. Erst dann erfolgt die Komponentenfertigung. Schließlich werden die Großprojekte gebaut und durch die Betreibergesellschaft, den Energieversorger oder eine Kommune be-

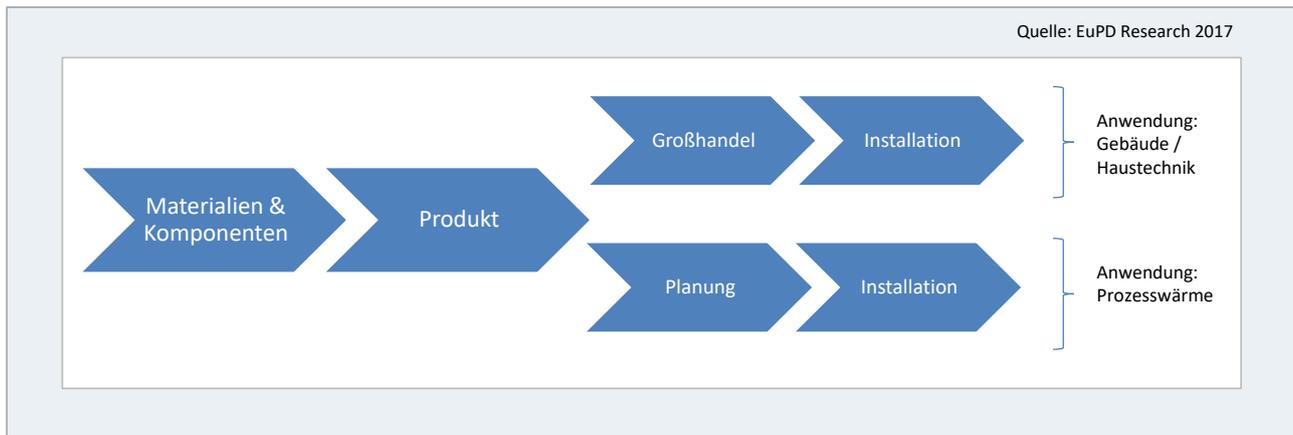
trieben. Tabelle 3.4 stellt die jeweiligen wesentlichen Komponenten der Technologien, deren Wertschöpfungsketten in diese Kategorie fallen, dar.

3.8.1.2 Kleinprojekte

Die Bezeichnung Kleinprojekte bezieht sich hier auf Anwendungen im Haushaltsbereich oder im kleineren kommerziellen Segment. Die Wertschöpfungskette in Abbildung 3.9 ist etwas dezidierter als für Großprojekte dargestellt, da sich alle darunterfallenden Technologien im Herstellungsprozess ähneln. In diese Kategorie fallen neben sämtlichen elektrochemischen Speichern auch Doppelschichtkondensatoren, die ebenfalls zur Anwendung in Kleinprojekten geeignet und von der Struktur der Wertschöpfung ähnlich zu elektrochemischen Speichern sind. Auf der ersten Wertschöpfungsstufe „Material“ geht es primär um die Gewinnung von Rohstoffen für den weiteren Herstellungsprozess. Je nach Technologie werden u. a. folgende Rohstoffe benötigt:

- Blei
- Nickel
- Cadmium
- Keramiken
- Kobalt
- Kohlenstoff (in verschiedensten Formen)
- Lithium
- Natrium
- Schwefel
- Zink
- Brom
- Vanadium

Außerdem müssen zum einen Materialien für den Elektrolyten (Schwefelsäure, Alkalien etc.) sowie andererseits für den Separator (Kunststoff, Glasfasergewebe oder poröse Keramiken) gewonnen bzw. hergestellt werden. Bei der Batterieherstellung kommt dann in beiden Fällen das Gehäuse hinzu. Ein zentraler Punkt bei diesen Tech-

Abbildung 3.8. Wertschöpfungskette im Wärmesektor.

Quelle: Eigene Darstellung (EuPD Research)

nologien ist die letzte hier betrachtete Stufe der Wertschöpfungskette: das Recycling. Dabei geht es um die Rückgewinnung der eingesetzten Rohstoffe (z. B. Lithium). Je größer die Nachfrage nach Batterien aus den verschiedenen Sektoren wird, desto wichtiger wird die Entwicklung von effizienten Verfahren zur Rückgewinnung notwendiger Rohstoffe, um diese Nachfrage nachhaltig und wirtschaftlich bedienen zu können.

3.8.2 Wertschöpfungsketten im Wärmesektor

Im Segment der Wärmespeicher wird zunächst eine allgemeine Wertschöpfungskette wie in Abbildung 3.8 dargestellt definiert. Dabei wird eine Differenzierung dahingehend vorgenommen, für welchen Anwendungszweck die jeweilige Technologie jeweils vorgesehen wird. Wird der Speicher im Bereich der Gebäude- bzw. Haustechnik eingesetzt, spielt neben dem Installateur auch der Großhandel eine wichtige Rolle. Bei Großprojekten, wie es bspw. bei der Anwendung von latenten Wärmespeichern sein kann, müssen hingegen Planungsbüros einbezogen werden. Zentral ist aber, dass sich je nach Technologie die Komponenten unterscheiden. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die wichtigen Komponenten von Wärmespeichern dargestellt.

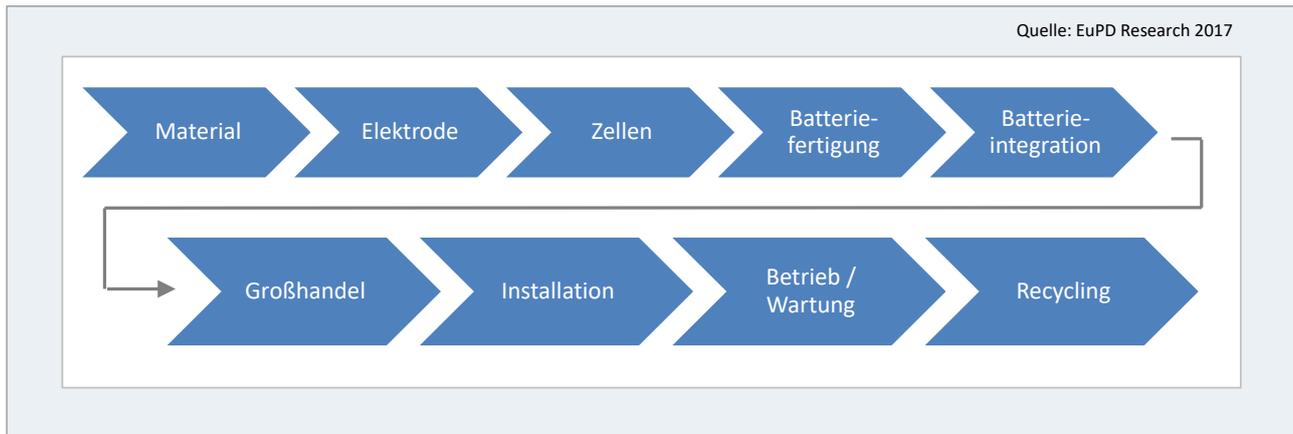
3.8.2.1 Sensible Wärmespeicher

Für sensible Speicher werden – unabhängig vom Speichermedium – ein Tank, ein Wärmetauscher, Isoliermaterial und Rohre benötigt. Hinzu kommen die technologiespezifischen Komponenten. Als Speichermedium kommen dabei vorrangig Wasser, Kies/Sand, Granit, Beton, Ziegelstein, Eisen, Wärmeträgeröl, Salzsäure oder Natrium in Frage.

3.8.2.2 Latente Wärmespeicher

Wesentliche Komponenten bei latenten Speichern sind zunächst Behälter, Wärmetauscher, Pumpen und Rohre. Neben diesen Basiskomponenten wird auch hier ein Speichermedium benötigt. Dabei kommen vorrangig folgende Materialien in Betracht:

- Wasser
- Salzhydrate
- Paraffine
- Clathrate
- Fettsäure
- Zuckeralkohole
- Nitrate
- Hydroxide

Abbildung 3.9. Wertschöpfungskette bei Kleinprojekten im Stromsektor.

Quelle: Eigene Darstellung (EuPD Research)

- Chloride
- Fluoride

Des Weiteren ist bei latenten Speichern die Verkapselung, d. h. der eingesetzte Speicherbehälter, von Bedeutung. Makroverkapselungen bestehen aus Kunststoff oder Folie und haben einen Mindestdurchmesser von 1 cm.¹⁶¹ Ähnlich, jedoch in wesentlich kleineren Dimensionen, ist die sogenannte Mikroverkapselung. Sie ist ein physikalischer oder chemischer Prozess, bei dem kleine, flüssige oder feste Teilchen von 1 bis 100 µm Durchmesser mit einer festen Hülle umgeben werden.¹⁶²

3.8.2.3 Thermochemische Wärmespeicher

Thermochemische Speicher sind im Vergleich zu den hier betrachteten Wärmespeichern die Technologie, welche am weitesten von einer Marktreife entfernt ist. Vor dem Hintergrund spielt daher die Anwendung im Segment der Gebäudetechnik in kleinerem Maßstab noch keine Rolle.

Die Wärmespeicherung beruht auf einer endothermen Reaktion. Durch die exotherme Rückreaktion kann die Wärme wieder freigesetzt werden. Oftmals wird hierfür

die Sorption von Wasser an Speichermedien genutzt. Diese Medien können u. a. Salzhhydrate, Hydroxide, Carbonate, Silikagel, Metallhydride, Zeolithe, Metall (Zink), Aluminiumoxid, Adsorberharze (z. B. Styrol) und Aktivkohle, Anthrazit, sowie Lithiumbromid, Ammoniak und Schwefelsäure sein. Zur Speicherung werden diese getrocknet (d.h. wasserfrei gemacht).

¹⁶¹ BINE Informationsdienst (2017).

¹⁶² FVS (2001).

4 Struktur der Thüringer Energiespeicherbranche (Ist-Analyse)

4.1 Unternehmensstrukturen

Zur Identifikation der Unternehmen in Thüringen wurde zum einen auf bestehende Datenbanken von EuPD Research zurückgegriffen, zum anderen wurden ergänzend externe Firmendatenbanken hinzugezogen. Im Rahmen der Unternehmensrecherche erfolgte die Identifizierung der Unternehmen, die gemäß den zuvor beschriebenen Wertschöpfungsketten im Stromspeicher- bzw. Wärmespeichersektor relevant sind.

Der nächste Schritt umfasste die Detailbetrachtung der identifizierten Unternehmen hinsichtlich Kennzahlen wie Umsatz, Beschäftigung und Produktportfolio. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Analyse differenziert nach Strom und Wärme auf aggregierter Ebene beschrieben.

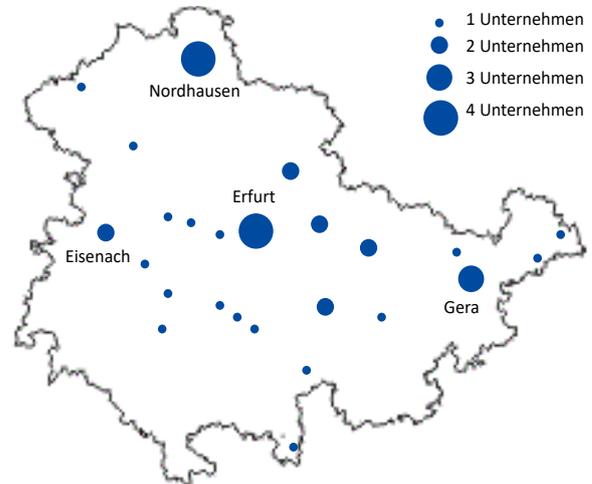
4.1.1 Speicher im Stromsektor

Insgesamt wurden in dem Segment Stromspeicher 41 Thüringer Unternehmen identifiziert. Dabei ist anzumerken, dass auch Stromspeicher installierende Handwerksbetriebe integriert wurden. Allerdings erfolgte die Aufnahme von Installateuren in die Analyse nur, wenn sie eindeutig Stromspeicher in ihrem Portfolio anbieten (und beispielsweise nicht nur Photovoltaik). Abbildung 4.1 verdeutlicht die räumliche Konzentration der identifizierten Unternehmen auf das Gebietsdreieck Gera-Eisenach-Nordhausen.

Die Unternehmen erwirtschafteten im Segment Stromspeicher in Summe rund 47 Mio. € im Jahr 2015. Beschäftigt waren in diesem Jahr etwa 390 Personen. Demnach ergibt sich eine Produktivität von 120.000 € pro Mitarbeiter. Dieser relativ geringe Wert ist wiederum auf den hohen Anteil von Handwerksbetrieben zurückzuführen. Im Hinblick auf die Gründungsstruktur zeigt sich, dass das Gros der Unternehmen im Rahmen der Wiedervereinigung ab 1991 gegründet wurde.

Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 zeigen die Thüringer Unter-

Abbildung 4.1. Geographische Verteilung der Thüringer Unternehmen im Stromsektor.



Quelle: Eigene Erhebung (EuPD Research)

nehmen, die im Bereich Großprojekte (industrielle Anwendungen) bzw. Kleinspeicher (private (in Einfamilienhäusern) und kleingewerbliche Anwendungen) tätig sind, jeweils in alphabetischer Reihenfolge. Dabei können Unternehmen in beiden Bereichen tätig sein.

In dem Segment der Großspeicher zeigt sich, dass die Anzahl der Unternehmen, die in diesem Sektor tätig sind, überschaubar ist. Dabei spielt insbesondere die Projektplanung eine Rolle. Allerdings wird bei der Betrachtung der Wertschöpfungskette deutlich, dass der Betrieb von Anlagen – bspw. von den Thüringer Pumpspeicherkraftwerken – nicht von Thüringer Unternehmen übernommen wurde. In dem Fall von Pumpspeicherkraftwerken liegt der Betrieb bspw. bei Vattenfall. Der Bau des Pumpspeicherkraftwerks Goldisthal hingegen wurde u. a. von der Bickhardt Bau Thüringen GmbH umgesetzt. Diese ist eine Tochterfirma der Bickhardt Bau AG, die ihren Hauptsitz in Kirchheim (Hessen) hat. Im Segment der Kleinspeicher hingegen ist die gesamte Wertschöpfungskette von Thüringer Unternehmen relativ umfassend abgedeckt. Insbesondere auf der Wertschöpfungsstufe der Installation sind eine Vielzahl von

Tabelle 4.1. Thüringer Unternehmen im Stromsektor (Großprojekte) nach Wertschöpfungsstufen.

Unternehmen	Sitz	Technologie / Spezialisierung	Planung	Finanzie- rung	Hersteller (Kompo- nenten)	Bau	Betrieb
BELECTRIC PV-Dachsysteme Thüringen GmbH	Sömmerda	Systemanbieter	●			●	
Bickhardt Bau Thüringen GmbH	Schwabhausen	Pumpspeicher	●			●	
KUMATEC Sondermaschi- nenbau & Kunststoffverar- beitung GmbH	Neuhaus- Schierschnitz	Druckelektroly- seur			●		
maxx solar & energie GmbH & Co. KG	Waltershausen	Systemanbieter	●				
Solar- & EnergieTechnik Dr. Bergmann GmbH	Langewiesen	Systemanbieter	●				
Sunset Solar GmbH & Co. KG	Löbichau	Systemanbieter	●				

Quelle: Eigene Erhebung (EuPD Research)

Unternehmen zu verorten. Da dies allerdings zumeist Handwerksbetriebe sind, weist der Sektor insgesamt eine relativ kleinteilige Unternehmensstruktur auf. Zudem wird bei der Betrachtung der Wertschöpfungskette deutlich, dass der Fertigungssektor – neben den Handwerksbetrieben – eine wesentliche Rolle einnimmt. Auf der einen Seite werden Komponenten und Materialien in Thüringen gefertigt, d. h. es besteht eine gute Zuliefererstruktur. Auf der anderen Seite werden diese Komponenten auch teilweise in dem Bundesland direkt weiterverarbeitet, sodass die Wertschöpfung in Thüringen bleibt. Ein starker Wachstumsimpuls für die Stromspeicherbranche im Freistaat könnte sich außerdem durch die im Juli 2018 getroffene Projektvereinbarung zur Ansiedlung eines Werkes des chinesischen Batterieherstellers CATL ergeben. CATL gilt als weltweit größter Batteriehersteller im Automobilbereich. Bis 2022 soll im Industriegebiet „Erfurter Kreuz“ auf 70 Hektar eine Lithium-Ionen-Batteriefabrik mit einer Produktionskapazität von 14 GWh pro Jahr entstehen. Das Unternehmen will hierzu 240 Mio. Euro investieren.¹⁶³ Ab 2026 werden dreistellige GW-Zahlen angestrebt.¹⁶⁴

4.1.2 Speicher im Wärmesektor

Im Wärmesektor können insgesamt 21 relevante Unternehmen in Thüringen identifiziert werden. Der Großteil dieser Unternehmen stellt Komponenten für Wärmespeicher her. Demzufolge ist die Zuliefererstruktur in diesem Sektor in Thüringen relativ stark ausgeprägt. Die Unternehmen wurden meist nach der Wiedervereinigung gegründet. Lediglich drei Unternehmen existierten bereits vor 1990. Die identifizierten Unternehmen erwirtschafteten im Segment Wärmespeicher insgesamt einen Umsatz von etwa 29 Mio. € (Stand 2015) und beschäftigen im Durchschnitt 15 Mitarbeiter. Insgesamt waren im Jahr 2015 etwa 180 Personen von den Unternehmen beschäftigt. Demzufolge erwirtschafteten die hier betrachteten Unternehmen ca. 160.000 € je Mitarbeiter. Abbildung 4.2 zeigt die räumliche Verteilung der Unternehmen. Dabei wird erneut die Konzentration auf den Raum von Erfurt bis nach Nordhausen sichtbar. Tabelle 4.3 listet die Unternehmen in alphabetischer Reihenfolge auf, die in dem Sektor Wärmespeicher aktiv sind – differenziert nach den im vorigen Kapitel definierten Wertschöpfungsstufen.

¹⁶³ TMWWDG (2018), <https://www.thueringen.de/th6/tmwwdg/service/pressemitteilungen/105749/index.aspx#3> (Zugriff: 31.08.2018)

¹⁶⁴ <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/catl-plaene-chinesisches-batteriewerk-in-erfurt-soll-groesser-werden-als-teslas-gigafactory/23949354.html?ticket=ST-1304582-yHwO7HZNVzeCxTrLtkfL-ap6> (Zugriff: 13.06.2019).

Tabelle 4.2. Thüringer Unternehmen im Stromsektor (Kleinspeicher) nach Wertschöpfungsstufen.

Unternehmen	Sitz	Technologie / Spezialisierung	Hersteller (Material)	Elektroden	Zellen	Batterieintegration/ -fertigung	Großhandel	Installation/ Wartung
Dettenbach Winfried	Heilbad Heiligenstadt	Elektrische Speicher						•
Dorstolar	Erfurt	Elektrische Speicher						•
EAS Germany GmbH	Nordhausen	Elektrische Speicher			•			
Electronicon Kondensatoren	Gera	Elektrische Speicher	Kondensatoren					
enerix Weimar	Weimar	Elektrische Speicher						•
Envites Energy Gesellschaft für Umwelttechnik und Energiesysteme mbH	Nordhausen	OEM Batterien				•		
EPC Technology GmbH	Rudolstadt	Chemikalienherstellung	Maschinenbau					
EPS-Solarstrom GmbH	Hermisdorf	Elektrische Speicher						•
ESS Bauplanungen und Energiesysteme GmbH	Gera	Elektrische Speicher						•
Excello Batteriekraftwerke GmbH	Schmalkalden	Modulare Lithium-Ionen-Speicher			•	•		
Extrawatt - Erneuerbare Energien GmbH	Weimar	Elektrische Speicher						•
FEGmbH	Sömmerda	Elektrische Speicher						•
GAIA Akkumulatoren-werke GmbH	Nordhausen	Lithium-Ionen-Zellen, Batterie-management-systeme			•			
Geraer Batterie-Dienst GmbH	Gera	Blei-Säure				•		
Hoffmann Energiesysteme	Erfurt	Elektrische Speicher						•
Ilja Ruhland	Langenleuba-Niederhain	Elektrische Speicher						•
IMG Electronic & Power Systems GmbH	Nordhausen	Batteriemangementssysteme				•		

Quelle: Eigene Erhebung (EuPD Research)

Tabelle 4.2 (Fortsetz.). Thüringer Unternehmen im Stromsektor (Kleinspeicher) nach Wertschöpfungsstufen.

Unternehmen	Sitz	Technologie / Spezialisierung	Hersteller (Material)	Elektroden	Zellen	Batterieintegration/ -fertigung	Großhandel	Installation/ Wartung
J&K Solarenergie Thüringen UG & Co. KG	Tambach-Diet- harz	Elektrische Speicher						•
JenaBatteries GmbH	Jena	Redox-Flow-Batterien			•	•		
Kochkommt Elektrotechnik	Bad Langensalza	Elektrische Speicher				•		•
KomSolar Service GmbH	Erfurt	Elektrische Speicher						•
Kustan Umwelttechnik GmbH	Rudolstadt	Redox-Flow-Batterien	Behälterbau					
maxx solar & energie GmbH & Co. KG	Waltershausen	Elektrische Speicher					•	•
Möve equipment & design GmbH	Mühlhausen	Maschinen zur Fertigung	Maschinenbau					
MTM Power Meßtechnik Mellnbach	Mellnbach	Batterie Ladegeräte	Lademodule					
Pro Energie AG	Schmalkalden	Elektrische Speicher						•
Robert Bosch Battery Solutions GmbH	Eisenach	Lithium-Ionen-Zellen				•		
Sinusstrom GmbH	Ilmenau	Regelenergie-speicher			•	•		
SOLARVENTUS Energie GmbH	Eisenach	Elektrische Speicher						•
Solarzentrum Wangenheim	Wangenheim	Elektrische Speicher						•
Sunset Solar GmbH & Co. KG	Löbichau	Elektrische Speicher				•		•
UST Umweltsensor-technik GmbH	Geschwenda	Temperatur+sensoren	Sensoren					
Uwe Kapell	Jena	Elektrische Speicher						•
Wollnik-Solartechnik	Pößneck	Elektrische Speicher						•
X-FAB Semiconductor Foundries AG	Erfurt	Halbleiter	Halbleiter					

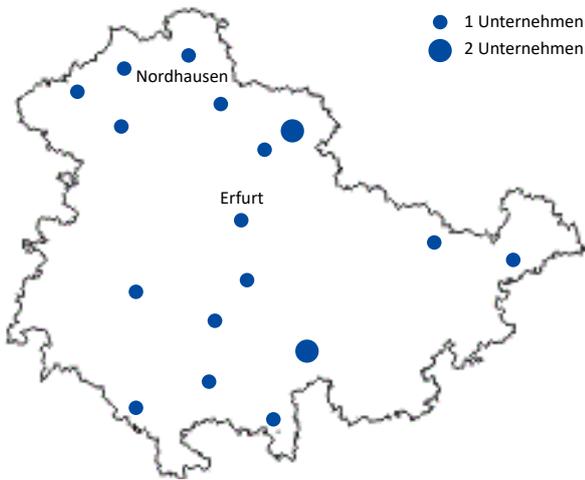
Quelle: Eigene Erhebung (EuPD Research)

Tabelle 4.3. Thüringer Unternehmen im Wärmesektor nach Wertschöpfungsstufen.

Unternehmen	Sitz	Technologie / Spezialisierung	Hersteller (Material & Komponenten)	Produkte	Großhandel	Planung	Installation
Apparate- & Behältertechnik Heldrungen GmbH	Heldrungen	Sensible Wärmespeicher	Behälterbau				
Apparatebau Nordhausen GmbH	Nordhausen	Thermische Speicher	Behälterbau				
ASBIT Chemie Salz	Parthenstein	Salzgewinnung, -verarbeitung und -anwendung	Salze				
CWK Chemiewerk Bad Köstritz	Bad Köstritz	Synthese von Polymeren bzw. Additiven	Salze				
DEUSA-International GmbH	Bleicherode	Salzgewinnung, -verarbeitung und -anwendung	Salze				
ESDA Technologie GmbH	Eisenberg	Latentwärmespeicher		●			
H.M. Heizkörper GmbH & Co. KG	Dingelstädt	Latentwärmespeicher		●			
K-UTEK	Sondershausen	Latentwärmespeicher außer Salz		●			
leitec® Gebäudetechnik GmbH	Heiligenstadt	Sensible Wärmespeicher				●	●
Optima-Haustechnik GmbH	Obermaßfeld- Grimmenthal	Produktion und Vertrieb von Wärmespeichern			●		●
Plecher & Herden GmbH Heizung, Klima, Lüftung	Rückersdorf	Sensible Wärmespeicher				●	●
Power Tank GmbH	Sonneberg	Latentwärmespeicher außer Salz	Behälterbau				
Reha-Tec GmbH	Brotterode-Trusetal	Sensible Wärmespeicher		●			
Saline Stadtilm GmbH	Stadtilm	Salzgewinnung, -verarbeitung und -anwendung	Salze				
smartpolymer GmbH	Rudolstadt	PCM	PCM				
SWE Energie GmbH	Erfurt	Sensible Wärmespeicher				●	
ThüSolar GmbH	Rudolstadt	Sensible Wärmespeicher					●
UST Umweltsensor-technik GmbH	Geschwenda	Temperatursensoren	Sensoren				
Va-Q-tec AG	Kölledda	Sensible Wärmespeicher		●			
VAU Energy GmbH & Co. KG	Heldrungen	Plattenwärmetauscher	Wärmetauscher				
Verbundwerkstoff- und Kunststoffanwendungstechnik GmbH	Schönbrunn	Sensible Wärmespeicher		●			

Quelle: Eigene Erhebung (EuPD Research)

Abbildung 4.2. Geographische Verteilung der Thüringer Unternehmen im Wärmesektor.



Quelle: Eigene Erhebung (EuPD Research)

Dabei wird die Dominanz des Zuliefersektors deutlich. Auf Dienstleistungsebene hingegen konnten lediglich drei Unternehmen identifiziert werden. Die Produkte der Zulieferer reichen von Behältern über Salze als Speichermedium zu PCM-Speichermaterialien.

4.2 Forschungsstrukturen

Zur Untersuchung der bestehenden Forschungsstrukturen und -schwerpunkte wurden Forschungseinrichtungen identifiziert und hinsichtlich ihrer thematischen Ausrichtung betrachtet. Insgesamt zeigt sich, dass Thüringen über eine gute Grundlagenforschung verfügt. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf dem Bereich der elektrochemischen Stromspeicher. Im Folgenden werden die Forschungsinstitute, die in diesem Bereich aktiv sind, im Hinblick auf ihre Tätigkeitsschwerpunkte beschrieben.

4.2.1 Center for Energy and Environmental Chemistry (CEEC) / Friedrich-Schiller-Universität Jena

2010 wurde von der Friedrich-Schiller-Universität (FSU) Jena und dem Fraunhofer IKTS Hermsdorf / Dresden erstmals ein gemeinsames Konzept für das „Center for

Energy and Environmental Chemistry“ (CEEC Jena) erarbeitet. Zielstellung war es, ein gemeinsames Energie- und Umweltzentrum zu entwickeln. Im August 2014 folgte die offizielle Gründung des CEEC Jena als universitäres Zentrum.

Im Thüringer Innovationszentrum CEEC Jena werden Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung im Bereich der Energie und Umweltforschung vereint. Hierbei stehen vor allem neue Materialien im Fokus (Polymere, Kohlenstoffmaterialien, Keramiken und Gläser). Es werden insbesondere Batteriesysteme entwickelt, die ohne kritische Rohstoffe auskommen. Im Zuge dessen wird vor allem an Konzepten, Materialien und Verfahren geforscht, welche auf Polymeren, Natrium-Ionen und Keramiken basieren. Dabei ist hervorzuheben, dass diese Ansätze sich durch eine sehr gute Verfügbarkeit der Materialien in Deutschland und Europa auszeichnen (z. B. Kohlenstoff, Natrium, Schwefel). Zurzeit werden fünf Ansätze für die unterschiedlichsten Anwendungsszenarien verfolgt:

- Organische Radikal-Batterien – druckbare Batterien aus organischen Rohstoffen für Dünnschicht-Applikationen (z. B. für das „Internet of Things“)
- Solare Batterien – Hybridsysteme, die Energiegewinnung und Energiespeicherung vereinen
- Natrium-Ionen-Batterien – leistungsstarke Alternativen zu Lithium-Batterien
- Polymerbasierte Redox-Flow-Batterien – sichere, günstige und skalierbare stationäre Energiespeicher
- Keramische Batterien – Natrium-Nickelchlorid-Batterien als stationäre Energiespeicher¹⁶⁵

Weiterhin wurde an der FSU Jena im Wintersemester 2015/2016 der neue Masterstudiengang „Chemie-Energie-Umwelt“ ins Leben gerufen. Energiespeicher, insbesondere Batterien, stellen zentrale Studieninhalte dar.

¹⁶⁵ CEEC (2017), <http://www.ceec.uni-jena.de/Forschungsgebiete/Energiespeicherung.html> (Zugriff: 29.08.2018).

4.2.2 Technische Universität Ilmenau – Fachgebiet Elektrochemie und Galvanotechnik

Eine weitere Forschungseinrichtung in dem Gebiet elektrochemischer Speicher ist die Technische Universität Ilmenau mit ihrem Fachgebiet Elektrochemie und Galvanotechnik. Die Forschungsaktivitäten zielen dabei auf eine Verbesserung der spezifischen Energie- und Leistungsdichten, Effizienzen, sowie Material- und Ressourceneinsatz von elektrochemischen Speicherzellen ab. Diese Arbeiten sind eng mit dem Thüringer Innovationszentrum Mobilität (ThIMo) verknüpft. Im Rahmen dessen wird eng mit der ThIMo-Forschergruppe "eMobil" zusammengearbeitet und an dem Design eines Energiespeichers für eine 25 kW Antriebseinheit gearbeitet. Weitere Forschungsschwerpunkte der Technische Universität Ilmenau sind

- Nanostrukturen aus Titandioxid und Silizium als Aktivmaterialien für die negative Elektrode von Lithiumionen-Batterien,
- Self Combustion Synthesis von Aktivmaterialien für die positive Elektrode von Lithium-Ionen-Batterien und
- ionische Flüssigkeiten als Elektrolyte in elektrochemischen Speichern und Wandlern.¹⁶⁶

4.2.3 Technische Universität Ilmenau – Institut für Thermo- und Fluidodynamik

Neben dem Fachgebiet Elektrochemie und Galvanotechnik verfügt die TU Ilmenau auch über das Institut für Thermo- und Fluidodynamik. Dort werden seit 1995 in Zusammenarbeit mit Industriepartnern Wärmespeicherkonzepte auf der Grundlage des Einsatzes Glasfaserverstärkter Kunststoffe (GFK) entwickelt und umgesetzt.¹⁶⁷

4.2.4 Hochschule Nordhausen – Institut für Regenerative Energietechnik (in.RET)

Das Institut beschäftigt sich im Allgemeinen mit Fragen der Energieeffizienz und Energienutzung und tritt dabei vor allem in beratender Tätigkeit auf. Auch im Bereich der Energiespeicherung liegt der Fokus vor allem auf interdisziplinären Fragestellungen zu einer effizienten und nachhaltigen Speicherung regenerativer Energien.¹⁶⁸ Außerdem wird mit dem Bachelorstudiengang „Regenerative Energietechnik (RET)“ an der Hochschule Nordhausen die Fachkräfteausbildung im Bereich der regenerativen Energieanlagen adressiert.

4.2.5 Bauhaus-Universität Weimar – Fakultät für Bauingenieurwesen

Die Bauhaus-Universität beschäftigt sich im Rahmen nachhaltiger Architektur auch mit Aspekten der Einbindung erneuerbarer Energien in das Bauwesen. Energiespeicherung spielt hierbei zwar nur am Rande eine Rolle, jedoch wird durch die Professur für Bauchemie und Polymeren Werkstoffe an der Fakultät für Bauingenieurwesen seit einigen Jahren konkret in Verbundprojekten auch an der Speicherung von Wärme in Salzhydrationsprozessen geforscht.¹⁶⁹

4.2.6 Fraunhofer IOSB-AST

In der Energieforschung behandelt das Fraunhofer IOSB-AST zukunftsorientierte Themen in Kooperation mit Partnern aus der Industrie, mit öffentlichen Fördergebern und auch mit anderen Forschungseinrichtungen. Neben Energiespeichern werden Themengebiete wie Demand Response sowie Demand Side Management betrachtet. Im Forschungsprojekt „Hybrider Stadtspeicher“ arbeitet das Fraunhofer AST bspw. gemeinsam mit anderen Fraunhofer-Instituten an einer kombinierten

¹⁶⁶ TU Ilmenau (2017), <https://www.tu-ilmenau.de/wt-ecg/forschung/energiespeicher-und-wandler/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁶⁷ TU Ilmenau (2017), <http://www.energie-depot.com/downloads/Speicher-aus-GFK.pdf> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁶⁸ Hochschule Nordhausen, Website des in.RET, <https://www.hs-nordhausen.de/forschung/inret/forschung/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁶⁹ Bauhaus-Universität Weimar, Website der Professur für Bauchemie und Polymere Werkstoffe, <https://www.uni-weimar.de/de/bauingenieurwesen/professuren/bauchemie-und-polymere-werkstoffe/forschung/> (Zugriff: 29.08.2018).

Hard- und Softwareplattform, mit der Energiespeicher, -erzeuger und -lasten zu einer virtuellen, regelbaren Speichereinheit verknüpft werden können. Mit diesem Ansatz können die Vorteile der einzelnen Komponenten optimal genutzt werden. Ziel ist es, eine nachhaltige und kosteneffiziente Lösung für das Verteilernetz zu entwickeln und damit das „Grid-Balancing“ schon innerhalb regionaler Strukturen zu ermöglichen. Neben den einzelnen Komponenten adressiert das virtuelle Speicherkonzept auch eine 24-Stunden-Prognose von Energieerzeugung und -verbrauch, um die Potentiale des virtuellen Speichers optimal auszuschöpfen.¹⁷⁰

Ein weiteres Projektbeispiel des Fraunhofer IOSB-AST ist die Innovationsstudie Pellworm. Ziel der Innovationsstudie Pellworm war es, das Potential zur Umsetzung eines Smart Grid auf Pellworm zu identifizieren. Dafür wurde nicht nur die technische Ausgangssituation (Strombedarf und -erzeugung, Randbedingungen, Energiespeicheroptionen) analysiert, sondern auch die Akzeptanz der Bürger und die am Markt verfügbaren Technologiekomponenten hinterfragt. Ein Ergebnis ist, dass zusammen mit einem zentralen Energiespeicher und einem flexibleren Lastmanagement der Energiebezug vom Festland um bis zu 90 Prozent reduziert werden kann. Die Innovationsstudie wurde zusammen mit der E.ON Hanse AG, der Schleswig-Holstein Netz AG, der Fachhochschule Westküste und dem Kompetenzzentrum Windenergie (CEwind) angefertigt und durch die Innovationsstiftung Schleswig-Holstein gefördert.¹⁷¹

4.2.7 Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)

Im Fokus der Entwicklungen stehen beim Fraunhofer IKTS Hermsdorf im Bereich stationärer Energiespeicher

natriumbasierte Batterien, keramische Katalysatoren für Metall-Luft-Batterien und keramische Alkali-Ionen-Leiter. Im Institut werden durch werkstoffwissenschaftliche Ansätze und produktionstechnische Lösungen Materialien, Fertigungsverfahren sowie innovative Batteriedesigns anwendungsorientiert entwickelt. Das Fraunhofer IKTS verfügt dazu über eine hochmoderne Anlagen- und Analysetechnik. Dies bildet die Grundlage für die Untersuchung neuer kostengünstiger Prozesse und den Aufbau eines vertieften Verständnisses über Betrieb und Alterung von stationären Energiespeichern.¹⁷² Zudem wird im Bereich Power-to-Gas an der Entwicklung von Festoxidelektrolysezellen (Solid Oxide Electrolyser Cells (SOECs)) gearbeitet, sowie im Bereich der Latentwärmespeicherung an Zeolith-Materialien geforscht.

4.2.8 Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoffforschung e.V. (TITK)

Basierend auf den Forschungs- und Entwicklungsleistungen des „Institutes für Textiltechnologie der Chemiefasern“ hat sich die industrielle Forschung des TITK ausgehend von der textilen Kompetenz der Anwendung von Faserstoffen in der Textilindustrie zu einem modernen, weltweit anerkannten Institut für polymere Funktions- und Konstruktionswerkstoffe entwickelt. Als wirtschaftsnahe Forschungseinrichtung betreibt das TITK sowohl Vorlauf- als auch angewandte Forschung im industrienahen Bereich. Das TITK unterstützt hierdurch klein- und mittelständische Unternehmen in deren Innovationsbestreben mit interdisziplinärem Fachwissen, innovativen Ideen, Branchenkenntnissen sowie mit der Bereitstellung moderner technischer Infrastruktur.¹⁷³ Zu den Produkten des TITK zählen u. a. PCM-Materialien, die dort entwickelt und hergestellt werden.

¹⁷⁰ Fraunhofer IOSB (2017), https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/5379/Energiesysteme_Hybrider-Stadtspeicher.pdf?command=downloadContent&filename=Energiesysteme_Hybrider-Stadtspeicher.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁷¹ Fraunhofer IOSB (2016), https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/28214/Energietechnik_Innovationsstudie-Pellworm.pdf?command=downloadContent&filename=Energietechnik_Innovationsstudie-Pellworm.pdf (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁷² Fraunhofer IKTS (2017), https://www.ikts.fraunhofer.de/de/departments/energy_bio-medical_technology/system_intgeration_technology_transfer/stationary_energy_storage.html (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁷³ TITK (2017), <http://www.titk.de/3/institut/index.html> (Zugriff: 29.08.2018).

4.2.9 Institut für angewandte Bauforschung (IAB) Weimar gGmbH

Das IAB Weimar betreibt anwendungsorientierte Auftragsforschung in den Bereichen Baustoffe, technische Systeme, nachhaltiges Bauen und Prozesstechnik. Dabei fallen in den Bereich technische Systeme nach eigenen Angaben auch die Forschung an Energiesystemen.¹⁷⁴ Außerdem entwickelt das Institut derzeit in mehreren Kooperationsprojekten sensible und latente Wärmespeicher. Dabei liegt der Fokus auf der Erforschung und Anwendungserprobung neuer Wärmespeichermaterialien mit hoher spezifischer Wärmekapazität, um die Speicherkapazitäten wasserbasierte Systeme zu übertreffen. Zusätzlich werden durch das Institut auch die Gebäudeintegration sowie das Management adressiert.

4.3 Netzwerkstrukturen

Die Analyse der Unternehmens- und Forschungsstrukturen hat gezeigt, dass in Thüringen zahlreiche Akteure – insbesondere im Bereich der elektrischen Speicher – aktiv sind. Im nächsten Schritt gilt es zu untersuchen, inwiefern die Akteure bereits miteinander vernetzt sind und zusammenarbeiten, um mögliche Lücken zur Erschließung potentieller Synergien zu erkennen und diese gezielt anzugehen.

Nachstehend werden einerseits übergeordnete Netzwerke, Initiativen und Cluster beschrieben, die sich nicht ausschließlich mit dem Thema Energiespeicher beschäftigen. Andererseits werden themenspezifische Organisationen betrachtet.

4.3.1 Arbeitskreis Nachhaltige Energie und Ressourcenverwendung

Die Thüringer Innovationsstrategie (RIS3 Thüringen), deren Umsetzungsprozess durch das Thüringer ClusterManagement (ThCM) koordiniert wird, umfasst u.a. das In-

novationsfeld „Nachhaltige Energie und Ressourcenverwendung“. Im Arbeitskreis dieses Innovationfeldes sind aktuell 20 berufene Mitglieder aktiv. Der AK hat für Thüringen folgendes Leitziel definiert: „Thüringen wird Innovationsführer für Entwicklung, Design, Herstellung und Betrieb von nachhaltigen, erneuerbaren und effizienten Energieversorgungssystemen und -komponenten.“

4.3.2 Thüringer Erneuerbare Energien Netzwerk (ThEEN) e.V.

Der ThEEN e.V. wurde 2013 als Dachorganisation der erneuerbaren Energien, Energiespeicherung und Energieeffizienz in Thüringen gegründet. Ziel des ThEEN ist es, relevante politische Prozesse und Entscheidungen auf Landesebene zu unterstützen und ein Kompetenznetzwerk für erneuerbare Energien zu bilden, das die Leistungsträger aller regenerativen Energieformen vereint. Über seine Mitgliedsverbände Arbeitsgemeinschaft Thüringer Wasserkraftwerke e.V., Bundesverband Wind-Energie e.V. – Landesgruppe Thüringen, Erdwärme Thüringen e.V., Fachverband Biogas – Regionalbüro Ost, SolarInput e.V. sowie zahlreiche Einzelmitglieder, Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Kommunen und Institutionen vertritt und bündelt der ThEEN e.V. das Know-how von mehr als 300 Unternehmen.¹⁷⁵

Der ThEEN e.V. hat Arbeitsgruppen zu unterschiedlichen Themenbereichen ins Leben gerufen. Eine ist die Arbeitsgruppe Energiespeicherung (AG ES), die seit April 2015 besteht. Die Mitglieder setzen sich aus Unternehmen, Hochschulen, Forschungseinrichtungen und weiteren Akteuren der elektrischen und thermischen Energiespeicherung zusammen. Auf Wunsch der Mitglieder und zur Identifikation möglicher Kooperationen, werden regelmäßig die einzelnen Kompetenzen und Projekte der

¹⁷⁴ IAB Weimar gGmbH, Website, <https://www.iab-weimar.de/forschung/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁷⁵ ThEEN (2017), <https://www.theen-ev.de/de/theen.html> (Zugriff: 29.08.2018).

Arbeitsgruppenmitglieder vorgestellt.¹⁷⁶ Des Weiteren veranstaltet der ThEEN e.V. das Fachforum „Energiespeicherung mit Sektorkopplung“. Ziel des Fachforums „Energiespeicherung mit Sektorkopplung“ ist es, aktuelle Trends, Entwicklungen sowie deren Anwendung und Geschäftsmodelle zu diskutieren. Zielgruppe sind Vertreter aus Industrie, Energieversorgung, Forschung und Entwicklung. Ferner soll die Veranstaltung Hemmnisse und Lösungsansätze aufzeigen sowie frische Impulse für Forschung und Industrie setzen.¹⁷⁷

4.3.3 Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur (ThEGA)

Die ThEGA versteht sich als zentrales Kompetenz-, Beratungs- und Informationszentrum für die Entwicklungen in den Bereichen Energie und Kommune, Energie und Unternehmen, Initiative Bürgerkraftwerke, Elektromobilität und Ressourceneffizienz. Die qualitative Vernetzung zwischen öffentlicher Hand, Wirtschaft, Forschung, Bildung und Bürgern in Thüringen ist ihr Arbeitsinhalt. Sie agiert demnach als Vermittler und Katalysator.¹⁷⁸

4.3.4 Energie- und Umweltpark Thüringen e.V.

Der Verein fördert neue Technologien und Techniken für Maßnahmen jeder Art zum Schutz der natürlichen Umwelt. Dazu gehören u. a. Energiespeicher. Ein besonderes Anliegen des Vereins ist der Klimaschutz, mit Vorhaben zur Ausschöpfung von Energiesparpotentialen und zur Nutzung von regenerativen sowie Abfallenergien im unternehmerischen, öffentlichen und privaten Bereich. Der Verein fördert, koordiniert und trägt geeignete Projekte zur Demonstration, Beratung, Forschung, Entwicklung, Produktion und Anwendung in Thüringen.¹⁷⁹

4.3.5 Netzwerk PolymerTherm

Das Netzwerk PolymerTherm verfolgt das Ziel, die Entwicklung des PCM-Composites voranzubringen. Weitere Einsatzmöglichkeiten sollen identifiziert und die Markteinführung vorbereitet werden. Das Management obliegt der Agentur für Technologietransfer, Innovationsberatung, Patentverwertung mit Sitz in Gera.

Die Vision des Netzwerkes PolymerTherm ist es, Latentwärmespeicher als Standardtechnologie zur Wärme- oder Kältespeicherung zu etablieren und mit innovativen Speichertechnologien und Produkten zum Durchbruch, zur Festigung und zur gesellschaftlichen Akzeptanz der erneuerbaren Energien beitragen.¹⁸⁰

4.3.6 Innovationscluster Nachhaltigkeit – INA

Im Rahmen des SolarInput e.V. wurde das Innovationscluster Nachhaltigkeit (INA) Mai 2017 ins Leben gerufen. Dieses Cluster wird vom Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft unterstützt. Das Ziel des Clusters ist die Minderung des CO₂-Ausstoßes in Thüringen. Im besonderen Fokus ist hierbei die Photovoltaik.

4.3.7 H2-Well – Vision regionale Wasserstoffwirtschaft

Das WIR!-Konsortium beschäftigt sich mit Wasserstoff, welcher die Grundlage für die kombinierte Energie- und Mobilitätswende darstellen soll.¹⁸¹ Die Wasserstoffspeicherung ist hierbei ein Teilaspekt neben der Wasserstoffherzeugung aus lokalen erneuerbaren Energien sowie der Nutzung des Wasserstoffs (z.B. für Mobilitätsanwendungen).

¹⁷⁶ ThEEN (2017): <https://www.theen-ev.de/de/energiespeicherung.html> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁷⁷ ThEGA (2017), https://www.thega.de/index.php?id=1861&tx_cal_controller%5Bview%5D=event&tx_cal_controller%5Btype%5D=tx_cal_php-calendar&tx_cal_controller%5Buid%5D=3866&cHash=1786de162bab3ac10d88c5979fc93995 (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁷⁸ ThEGA (2017), <https://www.thega.de/ru/energiespeicherung/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁷⁹ EUT e.V. (2017), <http://www.eut-ev.de/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁸⁰ Polymer Therm (2017), <http://www.polymertherm.de/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁸¹ <http://www.h2well.de/> (Zugriff: 13.06.2019).

5 Geschäftsmodelle für Stromspeicher

Für das zukünftige Energienetz, das sich durch einen hohen Anteil volatiler, erneuerbarer Energien auszeichnen wird, steht eine Vielzahl an Flexibilitätsoptionen zur Sicherung einer stabilen Energieversorgung zur Verfügung. Dazu zählen verschiedenste etablierte Speichertechnologien, wie Pump- und Batteriespeicher, aber auch zunehmend neue Ansätze, wie Power-to-X als innovative Lösung für die sogenannte Sektorkopplung. Alle Speichertechnologien und alternative Optionen, die vom Netzausbau bis hin zur direkten oder indirekten Speicherung von Wärme / Kälte oder Gas reichen, stehen dabei miteinander im Wettbewerb. Ihr Einsatzbereich ist vielfältig und reicht u. a. vom Speicherbedarf auf der Ebene der Übertragungsnetze,¹⁸² über Verteilernetze¹⁸³ bis hin zu Systemdienstleistungen.¹⁸⁴

Um erfolgreich am Energiemarkt teilzunehmen (2017 wurden weltweit rund 443,5 Mrd. US-Dollar in dieser Branche investiert¹⁸⁵), werden tragfähige und flexible Geschäftsmodelle benötigt. Diese sollten nicht ausschließlich die Lösung eines volkswirtschaftlichen Problems, wie z. B. die Energiewende, sondern vor allem den bezifferbaren Mehrwert für den einzelnen Kunden im Fokus haben. Die Kunst wird es sein, auf regulatorische Rahmenbedingungen und schwankende Nachfragen der unterschiedlichsten Märkte reagieren zu können.

Zukunftsfähige Geschäftsmodelle benötigen demnach wachsende Märkte, müssen schnell auf veränderte Einsatzmöglichkeiten für Speicher reagieren und passende Lösungen kunden- und anwendungsspezifisch anbieten.

5.1 Pumpspeicherkraftwerke (PSW)

Die herausragende Bedeutung von Speichertechnologien für die Systemstabilität und Versorgungssicherheit bei der Integration der erneuerbaren Energien ist allseits bekannt. Um rasch auf Verbrauchsschwankungen reagieren zu können, werden Pumpspeicherkraftwerke als multifunktionale Kraftwerke von vielen als gegenwärtig einzig großtechnisch vorhandene und besonders flexible Kurzzeitspeicherlösung für Strom gesehen, die sich weltweit seit vielen Jahrzehnten etabliert hat und akzeptiert wird.¹⁸⁶

Das Geschäftsmodell mit PSW basiert auf den täglichen Preisschwankungen (sog. Preisspreads) im Stromgroßhandel. Pumpspeicher können dabei auf folgenden Märkten agieren:

- Day-Ahead-Markt,
- Intraday Day-Ahead-Markt,
- kontinuierlicher Intraday-Markt,
- Regelenergiemarkt (PRL, SRL, MRS).¹⁸⁷

Global wurden gut 85,2 Prozent der elektrischen Energie für die zeitliche Verschiebung und den damit verbundenen Arbitrage-Geschäften verwendet.

Die miteinander verbundenen Ober- und Unterbecken von PSW nehmen in nachfrageschwachen Zeiten (Schwachlastzeiten wie z. B. nachts) das Überangebot von elektrischer Leistung im Stromnetz durch den Pumpbetrieb auf. Sie pumpen das Wasser in ein Oberbecken und wandeln es in wertvolle Spitzenenergie

¹⁸² Der Bedarf an Stromspeichern wird mit einem stärkeren Ausbau der EE (über 90 Prozent) deutlich ansteigen (Agora Energiewende, Stromspeicher in der Energiewende, 2014).

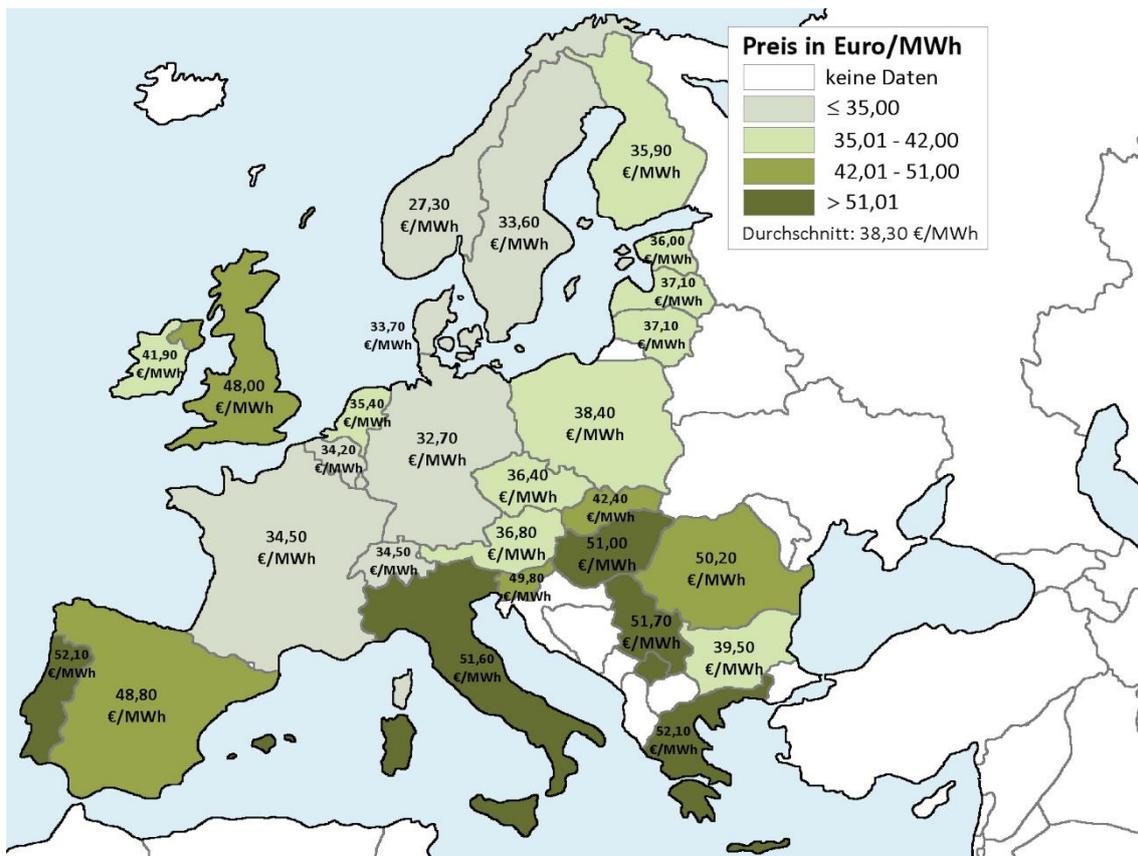
¹⁸³ Ein netzdienlicher Speichereinsatz kann auf der Niederspannungsebene zur Vermeidung oder Verzögerung des Netzausbaus beitragen und damit Kosten einsparen (Agora Energiewende, Stromspeicher in der Energiewende, 2014).

¹⁸⁴ Batteriespeicher eignen sich technisch hervorragend zur Bereitstellung von Primärregelleistung (Frequenz- und Spannungshaltung, Versorgungswiederaufnahme, Netzentlastung etc.), Agora Energiewende, Stromspeicher in der Energiewende, 2014.

¹⁸⁵ Frost & Sullivan, Global Power Industry Outlook, 2017.

¹⁸⁶ <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/plattform-pumpspeicherwerke/> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁸⁷ N. Krzikalla, „Potenzialstudie Pumpspeicherkraftwerke NRW“, 2017.

Abbildung 5.1. Mittlerer Strom-Großhandelspreis, 3. Quartal 2017.

Quelle: Europäische Kommission¹⁸⁸

(zum Abdecken von Verbrauchsspitzen z. B. mittags) und Regenergie (zum Ausgleichen unvorhersehbarer Verbrauchs- und Produktionsschwankungen), indem das Wasser wieder nach unten fließt und dadurch Turbinen antreibt, die den Strom erzeugen. Die Preisdifferenz zwischen Tag- und Nachtstrom bildet dabei den Ertrag, mit dem PSW Geld verdienen.

5.1.1 Markt

Pumpspeicherkraftwerke haben einen Anteil von 99 Prozent an der weltweiten Gesamtspeicherkapazität¹⁸⁹ und sind je nach Region mehr oder weniger rentabel (siehe Abbildung 5.1). PSW nutzen verschiedene Technologien, die wie folgt untergliedert werden können:

- Deriaz-Pumpturbinen mit verstellbarer Drehzahl,
- konventionelle reversible Pumpturbinensätze mit variabler Drehzahl,
- konventionelle reversible Pumpturbinensätze mit fester Drehzahl,
- ternäre Sätze mit Pumpe und Turbine als getrennte Maschinen.¹⁹⁰

Die rund 350 weltweit aktiven Pumpspeicherkraftwerke¹⁹¹ hatten im Jahr 2016 zusammen eine Leistung von ca. 150 GW, Batterien ca. 2 GW.

Gingen 2016 neue PSW mit einer installierten Leistung von 6,4 GW ans Netz – fast doppelt so viel wie 2015 –

¹⁸⁸ <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/market-analysis> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁸⁹ Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Technologie (2012), „Pumpspeicherkataster Thüringen“.

¹⁹⁰ Jansen, O., „Pumpspeicherkraftwerke – Vergleich“, Dresdner Wasserbaukolloquium 2011.

¹⁹¹ ecoprogram GmbH, „Der Weltmarkt für Pumpspeicherkraftwerke“, 2013.

sind aktuell PSW mit einer anvisierten Leistung von 20 GW noch im Bau.¹⁹² Global Market Insights schätzt das Marktvolumen auf 350 Mrd. US-Dollar für 2024 und rechnet mit einer kumulativ installierten Leistung von 200 GW,¹⁹³ die laut der International Renewable Energy Agency, IRENA, auf bis zu 325 GW im Jahr 2030 anwachsen soll.¹⁹⁴ Verantwortlich für den Aufschwung sind zum einen der weltweit ansteigende Anteil der EE an der gesamten Stromerzeugung, die Expansion von Kohle- und Atomkraftwerken in asiatischen Ländern, aber auch zukünftige Instandhaltungsmaßnahmen aufgrund des relativ hohen Alters vieler amerikanischer und zum Teil auch europäischer Anlagen.

Asien gilt als der größte Wachstumsmarkt, der von China mit einer installierten Leistung von 26,7 GW (2016), die bis 2020 auf 40 GW erweitert werden soll,¹⁹⁵ geprägt wird. Aber auch die USA mit dem weltweit leistungsstärksten Pumpspeicherkraftwerk Bath County Pumped Storage Station (ca. 3 GW) und Europa zählen weltweit zu den starken Märkten für PSW.

In Deutschland dominieren E.ON, RWE, Vattenfall und EnBW mit mehr als 90 Prozent Marktanteil den PSW-Markt. 28 PSW stellen dabei ca. 7 GW Leistung und eine Gesamtspeicherkapazität von rund 40 GWh für das deutsche Stromversorgungssystem zur Verfügung. Werden die im grenznahen Ausland ins deutsche Netz einspeisenden PSW mitgezählt, steht sogar eine Leistung von 9,44 GW zur Verfügung.¹⁹⁶ Mit der Fertigstellung des PSW an der Bleilochtalsperre (1932), sind PSW in der thüringischen Wasser- und Energiewirtschaft fest verankert. Der Freistaat verfügt über 5 PSW und seit 2003 mit dem Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal (Kreis Sonneberg) nicht nur über Deutschlands größtes (1.060 MW),

sondern auch über das einzige in den letzten dreißig Jahren neu gebaute PSW (Betreiber Vattenfall).

5.1.2 Potentiale

Pumpspeicherkraftwerke sind besonders geeignet:

- um Schwankungen von EE auszugleichen (schnelle Aufnahme/Abgabe mehrerer 100 MW Strom),
- Stabilität der Stromnetze zu bewahren (schnelle Bereitstellung von Regelleistung),
- Engpässe im Stromnetz zu vermeiden (Erhöhung/Verringerung der Pump-/Generatorleistung),
- Spannungen stabil zu halten (flexible Bereitstellung von Blindleistung) und
- die Versorgungswiederaufnahme nach einem Stromausfall zu ermöglichen (Schwarzstartfähigkeit).

Die Potentialanalyse „Pumpspeicherkataster Thüringen“ identifizierte anhand von ausgewählten Kriterien – Topographie, Geologie, Wasserdargebot, Anbindung an das Stromnetz, Konflikte mit bestehenden Nutzen, Umwelt und Akzeptanz – 10 neue Standorte in fünf Regionen Thüringens,¹⁹⁷ mit einem Leistungspotential von ca. 4,8 GW, sowie drei Standorte an bestehenden Talsperren¹⁹⁸ mit einem Leistungspotential von 350 MW. Der Freistaat kann damit einen wesentlichen Beitrag zur Bereitstellung von Pumpspeicherenergie für Deutschland leisten und darüber hinaus als Know-how-Träger in der Pumpspeichertechnologie auftreten.

Auf europäischer Ebene kamen im Jahr 2016 ca. 1,8 GW an neuer Pumpspeicherleistung hinzu und ca. 2,5 GW sind noch geplant bzw. im Bau, wobei sich die Projekte

¹⁹² Iha, hydropower status report 2017, 2017.

¹⁹³ <https://www.gminsights.com/industry-analysis/pumped-hydro-storage-market> (Zugriff: 29.08.2018).

¹⁹⁴ IRENA, Roadmap for a Renewable Energy Future, 2016.

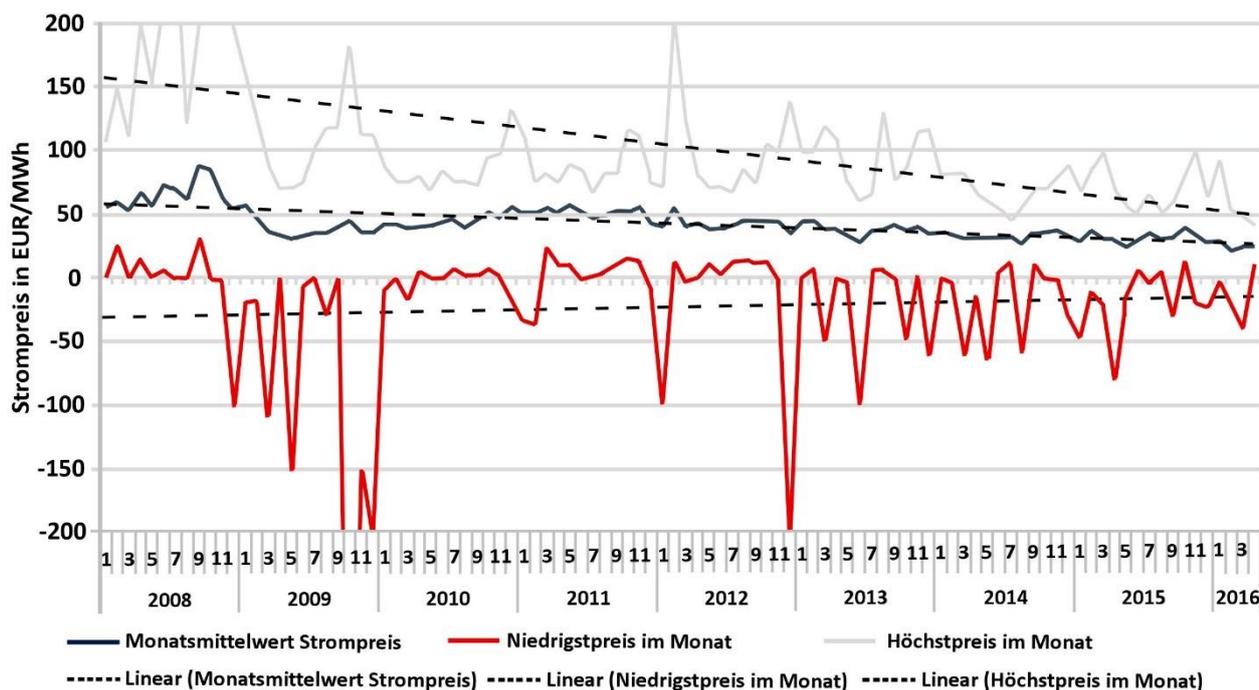
¹⁹⁵ Iha, hydropower status report 2017, 2017.

¹⁹⁶ Bundesnetzagentur, Monitoringbericht 2017, 2017.

¹⁹⁷ Ein Standort befindet sich im westlichen Thüringer Wald, zwei im östlichen Thüringer Wald, einer im Südharz, vier im westlichen Schiefergebirge im Einzugsgebiet der Saale und zwei im südlichen Thüringer Schiefergebirge im Einzugsgebiet des Mains.

¹⁹⁸ Schmalwasser, Weida und Hohenleuben.

Abbildung 5.2. Preisentwicklung an der Strombörse 2008 bis 2016.



Quelle: U. Lenk, *Innovatives Power-to-Heat Anlagenkonzept*, 2017

vorwiegend auf Frankreich und Spanien konzentrieren. Neben der Beauftragung zu einem regionalen Wasserkraft-Masterplan für den westlichen Balkan,¹⁹⁹ hat die Europäische Kommission das „eStorage“ Projekt finanziert. eStorage untersucht das Potenzial für Pumpspeicherkraftwerke in den 15 EU-Ländern sowie Norwegen und der Schweiz. Die Studie identifizierte ein Speicherpotential von 2.291 GWh an bereits bestehenden aber entwicklungsfähigen Speicherbecken, was ungefähr 95 Millionen Lithium-Ionen-Batterien, wie sie in den meisten Elektroautos zu finden sind, entsprechen würde. Mit einem Anteil von ca. 54 Prozent besitzt die Region in Südnorwegen die größte Pumpspeicherkapazität. Die Alpen besitzen ein Potential von 303 GWh und die Pyrenäen 118 GWh realisierbare Kapazität.²⁰⁰

Darüber hinaus entstehen weitere Potentiale für PSW mit neuen Konzepten. Im Pilotprojekt Naturstromspei-

cher (Gaildorf)²⁰¹ wird ein PSW mit einem Windpark kombiniert. Dabei dienen die Turmfundamente der Windanlagen als Wasserspeicher, die ein 16 MW PSW antreiben soll.

5.1.3 Herausforderungen

Das Geschäftsmodell von PSW hat mit vielen Herausforderungen zu kämpfen und droht aufgrund zukünftiger Marktsituationen und der Volatilität der Strompreise, die früher aufgrund der hohen Preisdifferenz zwischen Tag- und Nachtstrom ordentliche Erträge abwarfen, zu kippen (siehe Abbildung 5.2). Die Überkapazitäten in Europa und das Abschneiden der Photovoltaik-Spitzen in der Mittagszeit durch die vielen Solaranlagen führen zu niedrigen Spotpreisen an der Strombörse, sodass PSW nur noch selten rentabel arbeiten können. Ein weiteres Hemmnis, was es zu meistern gilt, sind die aktuellen

¹⁹⁹ Iha, *hydropower status report 2017*, 2017.
²⁰⁰ <http://www.estorage-project.eu/> (Zugriff: 29.08.2018).
²⁰¹ www.naturspeicher.de (Zugriff: 29.08.2018).

Rahmenbedingungen für PSW. Pumpspeicher genießen zwar verschiedene Vergünstigungen, keine EEG-Umlage auf den Pumpenstrom und Befreiung von der Stromsteuer, dennoch behandelt der Gesetzgeber PSW nicht als Kraftwerke, sondern als Letztverbraucher. Seit 2008 besteht eine Netzentgeltspflicht für alle Speicher und damit auch für PSW. Allerdings sind u. a. Neubauten 20 Jahre von den Netzentgelten befreit und Bestandsanlagen für 10 Jahre, wenn sie im Rahmen einer Modernisierung ihre Leistung erhöhen.²⁰² Aktuelle PSW werden dadurch im wirtschaftlichen Betrieb eingeschränkt, sind teuer und Erhaltungsinvestitionen unwirtschaftlich. PSW-Betreiber müssen Netzentgelt beim Bezug von Strom für den Pumpbetrieb als sogenannter Letztverbraucher zahlen, obwohl der endgültige Abnehmer des aus dem PSW in seiner Funktion als Kraftwerk in das Netz eingespeisten Stroms nochmals Netznutzungsentgelt zahlt. Das Netzentgelt wird also doppelt fällig. Die Politik muss hier Nachbesserungen liefern und verlässliche Bedingungen für bewährte und neue Energiespeicher schaffen. Denn wenn die EE die Stromversorgung übernehmen, reichen die aktuellen PSW mit einer Speicherkapazität von ca. 40 GWh nicht mehr aus. Experten der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) in Berlin haben ausgerechnet, dass die Abregelung von Anlagen bei einer installierten Solarstromleistung von 200 GW nur dann vermieden werden kann, wenn bei einer Überschussleistung von 70 GW täglich 500 GWh weggespeichert werden können.²⁰³

Pumpspeicher sind hier nur ein Teil im Verbund der Stromspeicher (neben Batterien, Druckluft etc.), da sie allein nicht den Ausgleich schaffen können. Da die PSW-Technologie das Energiesystem stützt und die Integration von EE ermöglicht, sollte hier rasch Planungssicher-

heit entstehen, denn die Vorlaufzeit bis zur Inbetriebnahme eines PSW ist lang und kostenintensiv. Planfeststellungsverfahren sowie die gesamte Projektplanung können sich so lange hinziehen, dass PSW erst 10 bis 20 Jahre nach Projektstart in Betrieb gehen können. Entwickeln sich energiewirtschaftliche und regulatorische Rahmenbedingungen für PSW dabei nicht positiv, werden Projekte nicht weiterverfolgt und können Millionen Euros verschlungen haben. Als „negatives“ Beispiel kann hier das PSW-Projekt Atdorf im Südschwarzwald aufgeführt werden. 2008 begannen die Planungen des 1,6 Mrd. Euro teuren Baus, der durch die Schluchseewerk AG (eine Tochter von RWE und EnBW) umgesetzt werden sollte. Mit dem Ende 2017 bekanntgegebenen Rückzugs von EnBW aus dem Projekt wird das PSW mit einer Leistung von 1,4 GW nun nicht mehr umgesetzt²⁰⁴ und EnBW muss mit dem Projekt-Ende mehrere Millionen Euro abschreiben.

5.2 Stationäre Batteriespeicher

Um eine vollständige Integration von erneuerbaren Energien in das Stromsystem zu erreichen, kristallisieren sich zunehmend Batteriespeicher als wichtiger Baustein im Verbund der sekundären Energiespeicher²⁰⁵ heraus, die zukünftig hohe Energieverbräuche und Leistungsspitzen abfedern und Auswirkungen der schwankenden Einspeisungen aus den volatilen Quellen Sonne und Wind zeitlich (Kurzzeitbereich bis zu einigen Stunden) ausgleichen können.

Batteriespeicher haben sich vor allem auf Basis der Blei- und Lithium-Ionen-Technologie für dezentralen Anwendungen etabliert. Neben bestehenden Märkten (USV, netzferne Batteriesysteme) steht künftig eine möglichst hohe Selbstversorgung (z. B. durch Erhöhung des Photo-

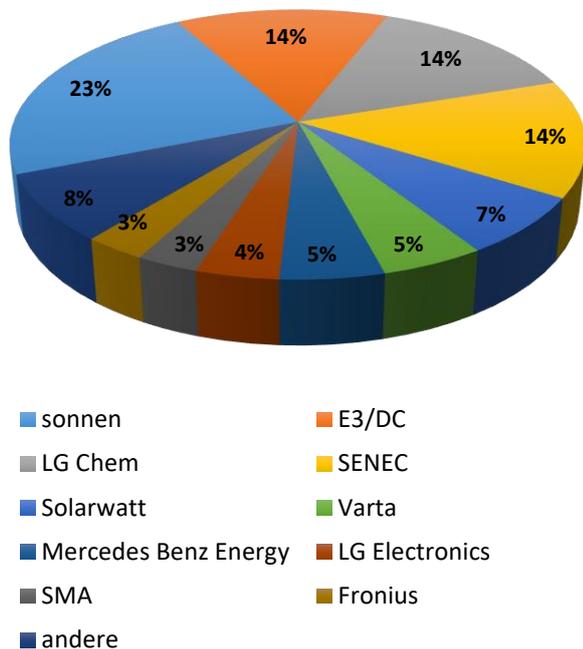
²⁰² Laut EnWG müssen neue PSW bis zum Jahr 2026 in Betrieb genommen werden, um eine befristete Befreiung von 20 Jahren auf die Netzentgelte zu erhalten. Bestehende PSW erhalten eine 10-jährige Befreiung, wenn nachweislich die Pump- bzw. Turbinenleistung um mindestens 15 Prozent erhöht UND deren speicherbare Energiemenge nachweislich um mindestens 5 Prozent erhöht wurde.

²⁰³ Quaschnig et al. (2015), „Die Bedeutung von dezentralen PV-Systemen für die deutsche Energiewende - 30. Symposium Photovoltaische Solarenergie“.

²⁰⁴ https://www.enbw.com/unternehmen/presse/pressemitteilungen/presse-detailseite_170304.html (Zugriff: 29.08.2018).

²⁰⁵ Unterschied primäre und sekundäre Energiespeicher: Primäre werden z. B. über Verbrennungstechniken einmalig entladen (Kohle, Gas). Sekundäre können mehrfach ge- und entladen werden (Pumpspeicher, Batterien).

Abbildung 5.3. Marktanteile der Top 10 Anbieter von Solarspeichersystemen im 1. Halbjahr 2017.



Quelle: EuPD Research

voltaik-Eigenverbrauchs) im Fokus. Steigende Stromkosten, die sich in Deutschland für private Haushalte auf ca. 2,1 Prozent p. a. und für Industriekunden auf ca. 4,5 Prozent p. a. bis 2024 belaufen werden,²⁰⁶ aber auch der technologische Fortschritt, der sich durch ansteigende Produktionszahlen von Batteriezellen und Systemen²⁰⁷ in Preissenkungen niederschlägt, ebnet den Weg für neue Märkte mit unterschiedlichsten Einsatzmöglichkeiten von Batteriespeichern.

5.2.1 Heimspeicher

Bevor Heimspeicher im Energiemarkt auftauchten, existierten Geschäftsmodelle, die z. B. auf Basis des im Jahr 2000 vom Deutschen Bundestag beschlossenen EEG²⁰⁸ vorwiegend PV-Anlagen adressierten und nur eine ein-

zelne Einnahmequelle hatten: Die Einspeisung erzeugter Energie zu Vergütungszwecken in das Stromnetz.

Seitdem 2011/2012 in Deutschland die Netzparität (d. h. der Strompreis entspricht den Stromgestehungskosten) für PV-Strom erreicht wurde, ist der Eigenverbrauch des von einer PV-Anlage erzeugten Stroms rentabler als dessen Einspeisung in das Stromnetz. Für Verbraucher entstand ab diesem Zeitpunkt ein finanzieller Anreiz, elektrische Energie eher selbst mit Photovoltaik zu erzeugen und zu verbrauchen, anstatt diesen aus dem Netz zu beziehen. Je größer die Differenz zwischen den Bezugskosten für Strom und den Stromgestehungskosten der PV-Anlage ausfällt, desto mehr lohnt sich demnach der Eigenverbrauch.

5.2.1.1 Markt

Eine Vielzahl von Herstellern hat das Potential von Heimspeichern und dem Anwendungsfall der „Eigenbedarfsoptimierung“ erkannt und so werden mittlerweile über 340 verschiedene Batteriespeichersysteme für Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie für kleine Betriebe auf dem deutschen Markt angeboten.²⁰⁹ EuPD Research untersucht dazu regelmäßig den Markt für Solarspeichersysteme. Abbildung 5.3 zeigt die Marktanteile der Top 10 Anbieter für das 1. Halbjahr 2017.

Das wachsende Engagement der Hersteller stützt sich zum einen auf das weltweite Marktwachstum im Segment Heimspeicher, das sich von ca. 6 GW in 2017 auf bis zu 40 GW in 2022 steigern soll.²¹⁰ Zum anderen können sich die Hersteller auch auf den riesigen Bestand an PV-Anlagen (deutschlandweit ca. 1,5 Mio. Ende 2016) und dem jährlichen Zubau um 1,5 GW stützen, der aber noch deutlich unter der von der Bundesregierung fest-

²⁰⁶ TU Dresden, Kurzgutachten zur regionalen Ungleichverteilung der Netznutzungsentgelte, 2015.

²⁰⁷ <https://www.photovoltaik.eu/Archiv/Meldungsarchiv/article-722053-110949/stromspeicher-produktionskapazitaeten-steigen-preise-sinken.html> (Zugriff: 29.08.2018).

²⁰⁸ Ursprünglich Start um 1990 mit dem 1.000-Dächer-Programm des Bundesforschungsministeriums, bei dem ca. 2.000 Anlagen mit Zuschüssen gefördert installiert wurden.

²⁰⁹ Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk, Marktübersicht Batteriespeicher, 2017.

²¹⁰ <http://www.vdi-nachrichten.com/Gesellschaft/Zeit-Grossspeicher-kommt> (Zugriff: 29.08.2018).

gesetzten Marke von jährlich 2,5 GW liegt.²¹¹ So wurden bis 2016 rund 52.000 Speichersysteme installiert. Im ersten Halbjahr 2017 setzten die Anbieter insgesamt 16.800 Speichersysteme²¹² ab und deren Anzahl soll laut Prognosen auf ca. 600.000²¹³ (2030) ansteigen. Zusätzlich profitieren Hersteller von den für die Batteriespeicher förderlichen Randbedingungen²¹⁴ und so wird sich das Geschäftsmodell „Heimspeicher“ weiter etablieren, muss aber, um für die Zukunft gerüstet zu sein, flexibel auf die Aktivitäten des Marktes – gesetzliche Rahmenbedingungen, neue Technologien etc. – reagieren.

5.2.1.2 Potentiale

Eigenbedarfsoptimierung. Der Eigenverbrauch durch selbstproduzierten Strom mit einer PV-Anlage liegt, aufgrund der Volatilität des Energielieferanten Sonne, im Durchschnitt bei 30 Prozent.²¹⁵ Um den Eigenbedarf signifikant zu erhöhen, bieten Batteriespeichersysteme die Möglichkeit, die über PV-Anlagen erzeugte Energie für den Eigenverbrauch zu speichern und zeitunabhängig zur Verfügung zu stellen.²¹⁶ Die Kombination aus PV-Anlage und Batteriespeicher – bei Heimspeichern mit einer Anlagengröße von 2,5 bis 15 kWh²¹⁷ – kann den Nutzungsgrad des vom Solardach produzierten Eigenstroms auf einen Anteil von bis zu 80 Prozent²¹⁸ und damit auch die Unabhängigkeit von Energieversorgungsunternehmen und tendenziell steigenden Strompreisen steigern. Thüringen zählt zu einem der wichtigsten Solarstandorte Deutschlands und rangierte 2016 im bundesweiten Ver-

gleich der installierten Photovoltaikleistung, mit 605,4 kWp pro 1.000 Einwohner, auf Platz 5.²¹⁹ Der Freistaat Thüringen fördert seit Jahren Aktivitäten im PV-Bereich und hat 2016 zur Förderung des Eigenstromverbrauchs das Förderprogramm „Solar Invest“ aufgesetzt, welches die Förderrichtlinie zur Förderung von Solaranlagen in Thüringer Kommunen (1000-Dächer-Solar-Programm) ablöst und noch bis zum 31.12.2019 läuft.²²⁰ Bis Juni 2017 wurden schon über 400 Förderanträge von privaten Haushalten gestellt, die in eine Photovoltaik-Anlage samt Heimspeicher investieren wollen. Dieses Engagement belohnt der Freistaat besonders und erhöhte den Etat schon zum zweiten Mal auf mittlerweile 5,7 Mio. Euro.²²¹

Elektromobilität. Obwohl Thüringen beim Thema Elektromobilität noch starken Nachholbedarf hat – mit 731 registrierten Elektrofahrzeugen von ca. 53.861 bundesweit rangiert der Freistaat auf Platz 12,²²² – wird die Versorgung von Elektrofahrzeugen zukünftig eine große Rolle spielen. Thüringen fördert gemeinsam mit dem Bund das Thema Elektromobilität. Bis 2020 können durch Bundes- und Landesmittel rund 300 neue Normalladestationen entstehen, sowie der Aufbau von Mobilitätsstationen unterstützt werden.²²³

Auch Heimspeicher können ihren Anteil zur Erhöhung der Elektromobilität im Freistaat Thüringen beitragen. Werden diese zwischen Netzanschluss und Ladestation geschaltet, wird ein zeitversetztes Laden ermöglicht. Die

²¹¹ Fraunhofer ISE, Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, 2017.

²¹² <https://www.eupd-research.com/startseite/detail-ansicht/heimische-anbieter-dominieren-wachsenden-deutschen-markt-fuer-solarspeicher/> (Zugriff: 29.08.2018).

²¹³ <http://www.ee-news.ch/de/article/35741> (Zugriff: 29.08.2018).

²¹⁴ Es fallen keine Netzentgelte an, da die meisten PV-Speicher < 10 kWh. Ökostrom-Einspeisevergütung für Neuanlagen durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG sinkt monatlich und eingekaufter Strom verteuert sich.

²¹⁵ Bezogen auf ein Fünf-Kilowattpeak-System, <https://www.volker-quaschnig.de/artikel/2012-10-solare-unabhaengigkeit/index.php> (Zugriff: 29.08.2018).

²¹⁶ Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft - Baden-Württemberg, Photovoltaik und Batteriespeicher, 2017.

²¹⁷ Deutscher Bundestag, Entwicklung der Stromspeicherkapazitäten in Deutschland von 2010 bis 2016, 2017.

²¹⁸ <https://www.volker-quaschnig.de/artikel/2012-10-solare-unabhaengigkeit/index.php> (Zugriff: 29.08.2018).

²¹⁹ https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/TH/kategorie/solar/auswahl/350-installierte_leistun/#goto_350 (Zugriff: 29.08.2018).

²²⁰ <http://www.thueringen.de/th8/tmuen/energie/erneuerbare/solarinvest/index.aspx/> (Zugriff: 29.08.2018).

²²¹ <https://www.pv-magazine.de/2017/07/04/thueringen-stockt-photovoltaik-foerderprogramm-solar-invest-nochmals-auf/> (Zugriff: 29.08.2018).

²²² Kraftfahrt-Bundesamt (2018), „Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken“ (Stand: 01.01.2018).

²²³ <https://www.thueringen.de/th8/tmuen/energie/mobilitaet/> (Zugriff: 29.08.2018).

Elektrofahrzeuge können Stromüberschüsse nutzen, auch wenn diese nicht ans Netz angeschlossen sind (Fahrzeugladung über Nacht). Dies kann bei entsprechender Batteriegröße das Stromnetz entlasten und bringt darüber hinaus den Vorteil, dass die Eigenbedarfsquoten beim Einsatz einer PV-Anlage erhöht und dadurch wiederum wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können.²²⁴

Netzdienlichkeit und virtuelle Speicher. Batteriespeichersysteme bieten insbesondere dann, wenn sie mit einer intelligenten Steuerung ausgestattet sind, schon heute die Möglichkeit einer Entlastung der öffentlichen Netze. Der Bedarf seitens der Netzbetreiber ist groß, denn aktuell könnten über 60 Prozent mehr netzdienliche PV-Batteriespeicher installiert werden, um Einspeisespitzen zu verringern.²²⁵ Diese netzdienlichen Speicher würden eine Kombination aus Eigenverbrauch und Systemdienstleistung erbringen, wie z. B. die Lieferung von Primärregelleistung. Dies würde Anlagenbesitzern (Optimierung Eigenverbrauch, Vergütung durch die Bereitstellung von PRL bis hin zur Steigerung des Autarkiegrads) und Netzbetreibern (Netzentlastung durch Kapung von Einspeisespitzen sowie Vermeidung oder Verzögerung des Netzausbaus) Vorteile generieren. Allerdings bedarf die Kombination aus Eigenverbrauchsoptimierung und Netzdienlichkeit weiterer Geschäftsmodelle, da einzelne Hausspeicher zu klein für netzdienliche Aufgaben ausgerichtet sind. So können Betreiber von virtuellen Großspeichern²²⁶ die Chance ergreifen und durch den Verbund von vielen kleinen Heimspeichern die Netze stabilisieren und Erlöse erwirtschaften. So starteten der ÜNB TenneT und die Sonnen GmbH mit der „Blockchain-Lösung“ von IBM²²⁷ bereits solch ein

Pilotprojekt, mit dem neben den Zielen Eigenbedarfsoptimierung und Netzdienlichkeit auch sogenannte „Arbitrage-Geschäfte“²²⁸ von steigendem Interesse werden können. So können virtuelle Speicher beim Handel am sogenannten Spotmarkt²²⁹ teilnehmen, der die Beschaffung von Strom zu günstigen Zeiten ermöglicht, um ihn anschließend in der Batterie einzuspeichern.

5.2.1.3 Herausforderungen

Das Geschäftsmodell für Heimspeicher steht zukünftig mit anderen Geschäftsmodellen in starker Konkurrenz. Bauen die Netzbetreiber ihre „Stromautobahnen“ aus, könnten sich die Marktpotentiale für eine Dezentralisierung, wie sie Heimspeicher adressieren, verringern. Daneben steht der Markt für die Elektromobilität in starker Konkurrenz mit dem für Heimspeicher, da dieser einen enorm hohen Bedarf an Batteriezellen hat, was wiederum zu Lieferengpässen bei einzelnen Technologien führen kann. Aber auch Quartierspeicher können zukünftig in starker Konkurrenz zu Heimspeichern stehen, da ihr individueller Nutzen und die Akzeptanz der Anwender höher liegt als bei einem einzelnen Heimspeicher. Zusätzlich existieren Herausforderungen auch bei grundsätzlichen Fragestellungen. Da kaum ein Batteriesystemhersteller Batteriezellen selbst produziert, sind diese von den Zulieferern abhängig. Dies betrifft zum einen die Qualität der gelieferten Zellen, da Batteriezellenhersteller nie ausschließlich Gutteile herstellen, sowie die Substitutionsmöglichkeit, da nicht jede Zellchemie zu jeder Kundenanforderung passt. Zum anderen kann auch eine Verknappung von Rohstoffen für einen bestimmten Zelltyp die Herstellung und damit das Produkt „Heimspeicher“ gefährden.²³⁰

²²⁴ T. Kaschub (2017), „Batteriespeicher in Haushalten unter Berücksichtigung von Photovoltaik, Elektrofahrzeugen und Nachfragesteuerung“.

²²⁵ Fraunhofer ISE, Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, 2017.

²²⁶ Viele dezentrale, kleine Speicher, die mit Hilfe von Kommunikationstechnik zu einem virtuellen Großspeicher zusammengeschlossen werden.

²²⁷ <https://www.tennet.eu/de/news/news/europaweit-erstes-blockchain-projekt-zur-stabilisierung-des-stromnetzes-startet-tennet-und-sonnen-e/> (Zugriff: 29.08.2018).

²²⁸ Ausnutzen der Preisunterschiede an Energiemärkten zur Gewinnerzielung.

²²⁹ <https://www.eex.com/de/produkte/produktueberblick> (Zugriff: 29.08.2018).

²³⁰ VDMA, Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030, 2016.

5.2.2 Quartierspeicher

Quartierspeicher zählen zwar zu den Großspeichern, aber ihr Funktionsprinzip ähnelt dem der Heimspeicher. Das heißt, mit Speicherkapazitäten von 100 kWh bis 1 MWh können solche Quartierspeicher leicht die 400-fache Kapazität eines Heimspeichers aufweisen, wobei dies mit entsprechend höheren Investitionssummen einhergeht. Der Systempreis eines Quartierspeichers setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen, die es so beim Heimspeicher nicht oder nur in kleineren Dimensionen gibt. Neben den Batteriezellen gehört eine umfangreiche Peripherie (Umrichter, Leistungselektronik, Container, Klimatisierung etc.) zum Inventar eines Quartierspeichers. Darüber hinaus wird dieser nicht, wie beim Heimspeicher üblich, im Haushalt des Verbrauchers platziert. Zwecks Größe und Anschaffungskosten obliegt die Zukunftsaufgabe der sogenannten „Nachbarschaftsspeicher“ nicht den einzelnen Haushalten und kleinen Betrieben, sondern Wohnungsgesellschaften, Bürger-Energie-Bündnissen oder kommunalen Versorgern und fokussiert sich auf Versorgungssicherheit sowie Wirtschaftlichkeit.

5.2.2.1 Markt

Das Geschäftsmodell „Quartierspeicher“ ist von größtem Interesse in der Wohnungswirtschaft. Es wurde aber aufgrund regulatorischer Randbedingungen in Deutschland stark behindert, so dass es aktuell nur wenige Projekte zum Thema Quartierspeicher gibt. Vorreiter beim Thema sind die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Niedersachsen, u. a. mit den Projekten „InnovationCity Ruhr“, „Triangulum“,

„Strombank“ oder „Esquire“. Mit „Smood – SmartNeighbourhood“ hat auch das Land Thüringen ein Projekt zum Thema Quartierspeicher begonnen, was sich aktuell noch in der Planungsphase befindet.²³¹ Zudem soll im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes der TEAG und der ads-tec GmbH im Dezember 2017 ein 240 kWh großer Quartierspeicher in Großretzbach in Betrieb gehen.²³² Darüber hinaus zeigen Umfragen, dass die Akzeptanz zur Anwendung von Quartierspeichern gegenüber Heimspeichern höher ist.²³³ Auch der globale Megatrend „Urbanisierung“²³⁴ (bis zum Jahr 2050 wird erwartet, dass ca. 2/3 der Weltbevölkerung in Großstädten wohnen werden²³⁵) lässt in Verbindung mit den erneuerbaren Energien ein riesiges Potential vermuten. So bieten Quartierspeicher die Chance, die zukünftige dezentrale Energieversorgung sicherzustellen.

5.2.2.2 Potentiale

Nicht nur der Megatrend Urbanisierung zeigt ganz klar auf, dass riesige Potentiale im Geschäftsmodell „Quartierspeicher“ liegen. Vorausblickend bieten Quartierspeicher für Deutschland ein interessantes Marktpotential. Bei über 1,5 Mio. Wohnungen, wovon allein über 240 „Großwohnraumsiedlungen“ mit mehr als 2.500 Wohnungen je Wohnsiedlung existieren,²³⁶ könnten über 2.000²³⁷ Quartierspeicher installiert werden. Thüringen bietet mit über 85.000 Wohngebäuden (Geschossbau einschließlich Wohnheime) ebenso ein nicht zu vernachlässigendes Potential im Quartiersbau.²³⁸ So existiert für Hersteller von Quartierspeichern ein umsatzstarker Markt von mehreren hundert Millionen Euro und mit Mieterstrommodellen²³⁹ können nicht nur PV-

²³¹ <https://www.theen-ev.de/de/smood-smart-neighborhood.html> (Zugriff: 29.08.2018).

²³² Daten entstammen der Antwort auf eine im Rahmen dieser Studie gestellten Anfrage an die Thüringer Energie AG (Stand: 15.09.2017).

²³³ Forschungsbericht BWPLUS, Strombank: Innovatives Betreibermodell für Quartierspeicher, 2016 (Zugriff: 29.08.2018).

²³⁴ <https://www.zukunftsinstitut.de/dossier/megatrend-urbanisierung/> (Zugriff: 29.08.2018).

²³⁵ United Nations, Department of Economic and Social Affairs, World Urbanization Prospects, 2014.

²³⁶ Deutscher Bundestag, Stadtbau und differenzierte Entwicklung von Großwohnsiedlungen - Kleine Anfrage der Fraktion die Linke an die Bundesregierung, 2013.

²³⁷ Bei Quartierspeichern mit ca. 2 MWh auf 1,5 Mio. Haushalte verteilt, Experteninterview Fraunhofer IKTS, 2017.

²³⁸ Thüringer Landesamt für Statistik, Pressemitteilung 182/2016, 2016.

²³⁹ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/mieterstrom.html> (Zugriff: 29.08.2018).

Anlagenbesitzer, sondern auch Mieter ohne eigene PV-Anlage die Vorteile der erneuerbaren Energien nutzen. Weitere Vorteile und volkswirtschaftlicher Zusatznutzen sind z. B.:

- zentrale Steuerung, Verwaltung und Wartung durch einen Betreiber (im Vergleich zu einer möglichen Einzelwartung bei jedem Heimspeicher),
- die Ressource „Speicherkapazität“ wird durch das Teilen effizienter als die Nutzung eines Heimspeichers – spezifische Investitionskosten je Kilowattstunde Speicherkapazität sind bei einem Quartierspeicher niedriger als bei einem Heimspeichern (Economy of Scale),
- geringere Verluste als bei einem Heimspeicher (effektivere Wechselrichter),
- einzelne Lastspitzen der Nutzer (z. B. Kochen, Waschmaschine etc.) erscheinen relativ zur Gesamtleistung des Speichers nicht mehr so scharf, wenn diese zeitlich über viele Mieter verteilt werden („Load Leveling“),
- Quartierspeicher verhindern an überlasteten Netzpunkten die Abregelung erneuerbarer Erzeuger und entschärfen kritische Netzsituationen,
- dank der hohen Flexibilität können Dienstleistungen zur Stabilisierung des Stromnetzes angeboten werden, z. B. Lastspitzen kappen („Peak-Shaving“) oder Regelleistung liefern,
- Unterstützung beim Ausnutzen der Unterschiede zwischen Bezugs- und Einspeisepreis, sogenannte „Arbitrage“-Geschäfte, wodurch wie beim „Virtuellen Großspeicher“ Erlöse generiert werden, die z. B. an die Nutzer weitergereicht werden könnten und
- Optimierung der Strombeschaffung und Stromkosten – Bezugskonditionen und Netznutzungsentgelte senken, indem z. B. am Spotmarkt teilgenommen wird.

Mit dem Gesetz zur Förderung von Mieterstrom entstehen nun neue wirtschaftliche Chancen für das Geschäftsmodell Quartierspeicher, was zu guter Letzt den Nutzern Autarkie ermöglichen kann, also die volle Versorgung mit selbst erzeugtem Strom.

5.2.2.3 Herausforderungen

Nur wenige Speichertechnologien bei den Großspeichern haben die notwendige technische Reife erreicht, um zu wettbewerbsfähigen Kosten umgesetzt zu werden. Erst wenn Batteriespeicher zur Quartiersversorgung in den Anschaffungskosten attraktiv werden, d. h. Systeme unter 500 €/kWh verfügbar sind, kann sich dieses Geschäftsmodell gegenüber Heimspeichern durchsetzen. Daneben beeinflussen aber noch andere Faktoren den Erfolg für Quartierspeicher. Auf der einen Seite müssen verbindliche regulatorische Bedingungen – was wird rechtlich als Großspeicher definiert, wie hoch sind Netzentgelte und Besteuerung (EEG-Umlage) – umgesetzt werden. Auf der anderen Seite müssen vor allem Teilnehmer gewonnen werden. Dies setzt eine hohe Akzeptanz der Technologie voraus und betrifft vorwiegend die Themen Datenqualität und -sicherheit, die beim Informationsaustausch zwischen Speicherbetreiber und Speichernutzer entstehen. Große regulatorische Probleme bestehen zudem durch gegenläufige Vorschriften, die unter anderem die freie Wahl des Stromanbieters durch die Mieter sicherstellen sollen.

5.2.3 Industriespeicher

Da Stromnetze keine Energie speichern können, stellen konventionelle Kraftwerke Regelleistung zur Verfügung, um den Ausgleich von Last und Erzeugung zu jeder Zeit sicherzustellen. Mit steigendem Anteil der erneuerbaren Energien und dem gleichzeitig stattfindenden Rückbau von Kraftwerken im Zuge der Energiewende suchen die deutschen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) verschiedenste Technologien zur Absicherung der Primär-

regelleistung (PRL). Große Batterien, sogenannte Industriespeicher mit einer Speicherkapazität von ca. 100 kWh bis zu 10 MWh, rücken dabei als eine technische und wirtschaftliche Optimierungsalternative von Energieversorgungssystemen immer mehr in den Fokus von Energieversorgern und Netzbetreibern. Sie gewährleisten zum einen den kontinuierlichen Vollabruf (100 prozentige Verfügbarkeit) der benötigten PRL (für mindestens 30 Minuten²⁴⁰) und helfen bei der Vermeidung und Verzögerung des Netzausbaus, indem sie konventionelle Kraftwerkskapazitäten bzw. Kraftwerkseinsätze verdrängen. Industriespeicher besitzen darüber hinaus ein viel breiteres Einsatzspektrum und können zukünftig auch für industrielle und gewerbliche Stromverbraucher sowie unabhängige Stromproduzenten zum Schlüssel für mehr Wertschöpfung werden.

5.2.3.1 Markt

Die globalen Investitionen in die Energiewirtschaft erreichten 2016 ein Volumen von 429,5 Mrd. US-Dollar und werden laut Frost & Sullivan um ca. 3,3 Prozent auf 443,52 Mrd. US-Dollar in 2017 anwachsen. Die Photovoltaik bildet dabei den größten Wachstumssektor. Mit rund 141,56 Mrd. US-Dollar werden hier fast 44 Mrd. US-Dollar mehr als in den Windenergie-Sektor investiert. Gerade in Europa macht sich die Energiewende besonders bemerkbar, da knapp 74 Prozent aller Investitionen in den Bereich für erneuerbare Energien fließen.²⁴¹ Dieser Wachstumstrend zeigt den kontinuierlichen Übergang hin zu dezentralisierten Energiesystemen, bei denen die Energiespeicherung ein immer größer werdender Faktor wird. So ist es nicht verwunderlich, dass auch der Markt für Industriespeicher stetig wächst.

Der weltweite Umsatz soll in diesem Segment bis zum Jahr 2021 stetig um 6,5 Prozent, auf 10,84 Mrd. US-Dollar²⁴² und bis 2027 auf bis zu 19 Mrd. US-Dollar,²⁴³ anwachsen. Laut Siemens wird der deutsche Markt bis 2019 um jährlich 5 Prozent wachsen, womit er zwar unter der Frost & Sullivan-Prognose von 6,5 Prozent liegt, aber dennoch einen Umsatz von ca. 1,1 Mrd. US-Dollar, bei einer installierten Leistung von rund 1,5 GW und 4,8 GW in 2024, generieren wird.²⁴⁴

5.2.3.2 Potentiale

Industriespeicher verdrängen immer mehr konventionelle Energieerzeuger. Sie drängen in Märkte wie die der Inselnetzwerke – sogenannte Microgrids mit einem Marktvolumen von 8,5 Mrd. US-Dollar²⁴⁵ – ersetzen dort die zur Erbringung der kritischen Systemdienstleistungen eingesetzten Dieselgeneratoren und ermöglichen deren Aufgaben ganz ohne fossile Brennstoffe. Darüber hinaus liegt deren USP im Vergleich zu alternativen Energielieferanten unter anderem auch in den niedrigen spezifischen Investitionskosten je Kilowattstunde Speicherkapazität (Economy of Scale), die aufgrund stetig fallender Systemkostenpreise viele weitere Anwendungen immer attraktiver werden lassen.

Bereitstellung von Primärregelleistung. Mit der punktgenauen und CO₂-neutralen Bereitstellung von PRL können Betreiber von Industriespeichern nach der Präqualifizierung vom zuständigen ÜNB an den wöchentlichen Ausschreibungen am Regelleistungsmarkt teilnehmen.²⁴⁶ Die Anwendung von Industriespeichern zur Bereitstellung von PRL stellt unter heutigen Rahmenbedingungen einen durchaus lukrativen Anwendungsbereich dar.²⁴⁷

²⁴⁰ Deutsche ÜNB, Anforderungen an die Speicherkapazität bei Batterien für die Primärregelleistung, 2015.

²⁴¹ Frost & Sullivan, Global Power Industry Outlook, 2017.

²⁴² MarketsandMarkets, Industrial Batteries Market by type and region - Global Forecast to 2021, 2016.

²⁴³ <http://energystorage.org/energy-storage/facts-figures> (Zugriff: 29.08.2018).

²⁴⁴ <http://kirillklip.blogspot.de/2016/09/energy-storage-siemens-is-expecting.html> (Zugriff: 29.08.2018).

²⁴⁵ Frost & Sullivan, Global Power Industry Outlook, 2017.

²⁴⁶ Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung, <https://www.regelleistung.net/ext/> (Zugriff: 29.08.2018).

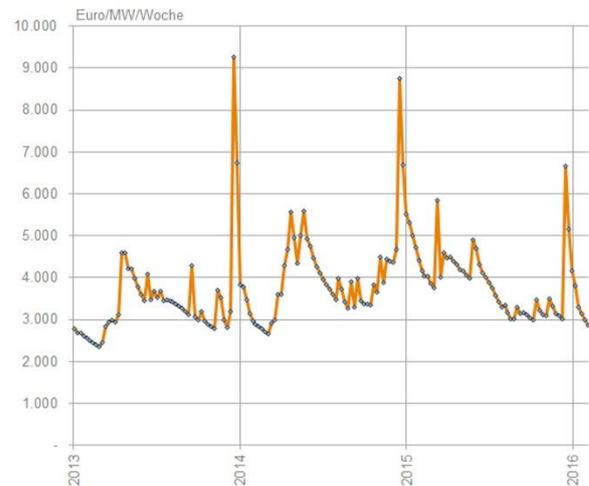
²⁴⁷ <http://reiner-lemoine-institut.de/technisch-wirtschaftliche-optimierung-der-teilnahme-einer-netzdienlichen-grossbatterie-am-primarregelleistungsmarkt-schachler-et-al-2017/> (Zugriff: 29.08.2018).

Den Markt im europäischen Verbundnetz mit einer Größe von ca. 3 GW (ca. 600 MW in Deutschland, ca. 2,4 GW im restlichen Europa) teilen sich dabei verschiedene Technologien.²⁴⁸ So wurden 2015 etwa 30 MW Batteriespeicherkapazität am PRL-Markt präqualifiziert.²⁴⁹ Einen Vorteil von der PRL-Bereitstellung haben dabei sowohl Netzbetreiber als auch die Betreiber der Industriespeichern. Die Netzbetreiber profitieren, indem sie die Netze nicht mehr auf Maximallast auslegen müssen. Die Speicher sind in der Lage kurzfristig einen Teil der Maximallast wegzunehmen, was langfristig hilft Kosten zu sparen. Netzbetreiber erhalten so eine günstigere Lösung zur Bereitstellung der PRL, da sie Netzausbau vermeiden können. Die Betreiber von Industriespeichern bekommen die Leistungspreiszahlungen für die PRL und müssen nur Wartung und Umsatzsteuer als Betriebskosten gegenrechnen. So erzielten Betreiber 2015 einen mittleren Leistungspreis von 3.679 € pro MW und Woche.²⁵⁰ Wie sich der mittlere Leistungspreis über 3 Jahre hinweg entwickelte, zeigt Abbildung 5.4.

Speicherung von Stromüberschüssen. Mit der Aufnahme von Stromüberschüssen entsteht vor allem dann ein weiterer interessanter Anwendungsfall, wenn nach 2020 die ersten großen PV-Anlagen aus der EEG-Förderung fallen. Die Erweiterung bestehender PV-Anlagen und Windparks mit einem Industriespeicher kann dann die Stromvermarktung optimieren und „Arbitrage-Geschäfte“ ermöglichen.⁴⁷

So sieht der Technologiekonzern Siemens vor allem bei langsamen (0,5 C und kleiner) Batteriespeichersystemen mit einer Speicherkapazität größer 1 MWh große Ertragspotentiale, wenn es um das reine Speichern von Stromüberschüssen geht. Das „Wegspeichern“ von PV-Strom soll bis zu 70% des zukünftigen Gesamtmarktes ausmachen.²⁵¹

Abbildung 5.4. Mittelwert wöchentlicher PRL-Leistungspreis (2013 bis 2016).



Quelle: www.regeleistung.net

Entscheidend für einen höchstmöglichen Ertrag ist dabei das Ensemble der Systemkomponenten. Neben der Leistungselektronik für den Umrichter, Peripherien wie Container, Klimatisierung etc. und den sogenannten „Soft Costs“ (Kosten für das Engineering und Development) sind vor allem die Batteriezellen bei einem Industriespeicher entscheidend. Sie können bis zu 60 Prozent der Gesamtkosten ausmachen.²⁵²

Dabei bestimmt vor allem die Schnelligkeit der verbauten Batteriezellen den Preis und damit die Systemkosten. So sind schnelle Batteriezellen (2C) für das „einfache Wegspeichern“ vom PV-Strom sprichwörtlich „überqualifiziert“. Langsame Zellen (0,5C und kleiner) reichen für diese Aufgabe völlig aus. Sie kosten weniger als „schnelle“ Batteriezellen (damit bleibt der Systempreis niedrig) und sie halten länger, da sie weniger Stress ausgesetzt sind, der z. B. durch häufiges Laden und Entladen eine Batterie schädigen kann.

²⁴⁸ Consentec GmbH, Beschreibung von Regelleistungskonzepten und Regelleistungsmarkt, 2014.

²⁴⁹ <https://enervis.de/wie-viel-batteriegrossspeicher-vertraegt-der-primarregelleistungsmarkt/> (Zugriff: 29.08.2018).

²⁵⁰ BVES, Faktenpapier Energiespeicher, 2016.

²⁵¹ <http://kirillklip.blogspot.de/2016/09/energy-storage-siemens-is-expecting.html> (Zugriff: 29.08.2018).

²⁵² McLaren et al., Battery Energy Storage Market, 2016.

Optimierung von Strombezugskosten. Viele Betriebe decken schon heute ihren Eigenbedarf mit einer PV-Anlage, da die Arbeitspreise und Netzentgelte die wesentlichsten Kostenfaktoren beim Strombezug darstellen. So bestimmt bei Unternehmen der Mittelspannungsebene oder mit einem Jahresverbrauch über 100 MW die höchste jährliche Netzlast die Netzentgelte. Ein Industriespeicher kann im Verbund mit einem Spitzenlastmanagement Lastspitzen kappen („Peak-Shaving“) und zur Vermeidung von Bezugsspitzen aus dem öffentlichen Netz beitragen. Bei einem hohen Leistungsbedarf wird der Strom aus der Batterie anstatt dem Netz bereitgestellt. Batteriespeicher senken damit die Netzbelastung und führen im Unternehmen zur Reduzierung der Jahreshöchstlast und damit der Netzentgelte. Zusätzlich rückt auch der sogenannte Spotmarkt in den Vordergrund. Er ermöglicht die Beschaffung von Strom zu günstigen Zeiten, der anschließend in der Batterie eingespeichert und bei Bedarf abgerufen werden kann.

5.2.3.3 Herausforderungen

Je nach Einsatzgebiet können verschiedene Eintrittsbarrieren den Marktzugang erschweren. So erfordert die Teilnahme am Regelenergiemarkt die Präqualifizierung der Stromspeicher durch den zuständigen ÜNB und die Erfüllung der Systemsicherheit des jeweiligen Energienetzes. Dies wird von Unternehmen jedoch als schwierig beschrieben, da sich Anforderungen an den Energiespeicher noch während der Bauzeit ändern können.²⁵³

5.2.4 Premium-Power

Auf die Einzelversorgung entlegener Verbraucher und vor allem sensibler Infrastrukturen, die auf eine qualitativ hochwertige Versorgung und Absicherung mit Strom

angewiesen sind, ist das Geschäftsmodell „Premium-Power“ ausgerichtet. Der Bedarf richtet sich an Batterien der Schutzkleinspannung (bis 50 Volt) aus, die in meist vorhandene Batterieschränke (für Modulgrößen 19 Zoll) integriert werden können. Die modulare Bauweise erlaubt dabei flexible Systemgrößen, die bis 100 kWh und mehr betragen können.

5.2.4.1 Markt

Kennzeichnend für den Markt „Premium-Power“ sind neben den relativ hohen Modulpreisen auch hohe Versorgungsqualitäten und -sicherheiten, die durch hohe Zertifizierungsansprüche (z. B. NEBS²⁵⁴) nachgewiesen werden müssen. Ein großes Marktpotential offeriert dabei die Telekommunikationsbranche. So ist die Energieversorgung von Telekommunikations-/Sendemasten, die zur Absicherung neuer Technologien (z. B. LTE und 5G) unumgänglich sind, ein lukratives Betätigungsfeld. Bis 2020 sollen 1,2 Mio.²⁵⁵ neue Masten zu den bereits über 5 Mio. bestehenden Masten²⁵⁶ hinzukommen. Mit einem jährlichen Wachstum von 8,6 Prozent soll das Marktvolumen im Jahr 2025 knapp 1,3 Mrd. US-Dollar betragen.²⁵⁷ Zum anderen stellen die weltweit 4,5 Mio. Rechenzentren²⁵⁸ ein weiteres Betätigungsfeld für das „Premium-Power“-Geschäft dar. Diese benötigen ebenso störungsfreie Abläufe. Gerade mit der in allen Branchen zunehmenden Digitalisierung werden Rechenzentren und damit deren unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) unabdingbar. Dies spiegelt sich auch in der Marktgröße und dessen Wachstum wieder. Im Jahr 2016 hatte der Markt ein Umsatzvolumen von rund 13,54 Mrd. US-Dollar und soll laut MarketsandMarkets jährlich um ca. je 10 Prozent bis auf 21,73 Mrd. US-Dollar im Jahr 2021 anwachsen.²⁵⁹

²⁵³ <https://www.photovoltaik.eu/article-693154-30021/wie-grossspeicher-geld-verdienen-.html> (Zugriff: 29.08.2018).

²⁵⁴ Network Equipment-Building System (NEBS) ist ein US- Industriestandard, der die Zulassung von Telekommunikationsgeräten bestimmt.

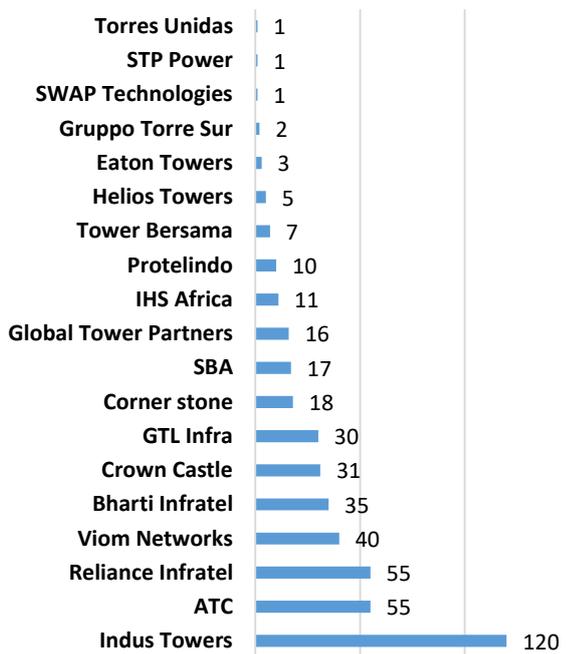
²⁵⁵ GSMA, Green Power for Mobile, 2014.

²⁵⁶ Wood, J.; Energy Storage used for Diesel Reduction and Renewables Intergration in Remote Telecom Applications, Battcon, 2015.

²⁵⁷ Future Market Insights, Global Telecom Tower Power System Market, 2015.

²⁵⁸ 451 Research, <https://451research.com/datacenter-knowledgebase-overview> (Zugriff: 29.08.2018).

²⁵⁹ MarketsandMarkets, Data Center Power Market by Solution, 2016.

Abbildung 5.5. Anzahl der Sendemasten in Tausenden.

Quelle: GSMA, Green Power for Mobile, 2014

5.2.4.2 Potentiale

Telekom Backup-Systeme. Weltweit sind mobile Telekommunikationssysteme mit Sende- bzw. Mobilfunkmasten im Einsatz. Abbildung 5.5 zeigt die weltweit größten Betreiber von Mobilfunkmasten samt der Anzahl betriebener Masten. Viele davon befinden sich in abgelegenen Orten, weswegen sie also schlecht oder gar nicht an ein Stromnetz angebunden sind. Diese Sende- bzw. Mobilfunkmasten benötigen vor allem eine sehr hohe Versorgungsqualität und Zuverlässigkeit, da auf den sogenannten „Repeater-Stationen“ die lokale Zustellung des Dienstes erfolgt. Die Stationen werden derzeit von PV-Anlagen, Windkraftanlagen oder Dieselgeneratoren versorgt, um die notwendige Zuverlässigkeit zu verbessern. Die Verwendung von Batteriespeichern könnten insbesondere in Hinblick auf die mehr als 4 Mio. eingesetzten Dieselgeneratoren einen ökologischen und

auch ökonomischen Mehrwert bieten. Ökonomisch reduziert ein passender Energiespeicher den Dieserverbrauch, indem sowohl der Dieselgenerator mit optimalem Energie-Output läuft als auch die Hilfsaggregate (z. B. Licht und Lüftung) in der Station betrieben werden können. Nachweislich werden zwischen 40 und 50% (Jahreszeitenabhängig) des Diesels eingespart, was zur Senkung der Betriebskosten führt und eine Amortisation des Batteriespeichers schon nach zum Teil 12 Monaten ermöglicht.²⁶⁰ Ökologisch führt weniger Dieseleinsatz zur CO₂-Reduktion und hilft parallel bei der Integration der erneuerbaren Energien.

Backup-Systeme für Rechenzentren. Die zunehmende Digitalisierung erfordert vor allem störungsfreie Abläufe in den Rechenzentren dieser Welt. Batteriespeicher spielen in diesem Segment, mit ca. 4,5 Mio. Rechenzentren,²⁶¹ daher eine entscheidende Rolle. Die Zielkunden stellen dabei hohe Anforderung an einen passenden Batteriespeicher. Neben entsprechenden Zertifizierungsnachweisen (NEBS Level 3) und der Versorgungsqualität, sind auch Kriterien wie Betriebskosten (Wartung, laufende Kosten) und geringe Aufstellflächen²⁶² im Auswahlprozess für eine Speicherlösung entscheidend.

5.2.4.3 Herausforderungen

Ähnlich wie die Präqualifizierung von Speichersystemen für die Bereitstellung von PRL haben Kunden der Kommunikationsbranche hohe Anforderungen an Energiespeichersysteme. So benötigen Batteriespeicher bestimmte Zertifizierungen (z. B. NEBS Level 3) um überhaupt für Ausschreibungen gelistet zu werden.

5.2.5 Speicherauswahl

Der Markt für die vergleichsweise junge Batterietechnologie entwickelt sich viel schneller als die gesetzlichen

²⁶⁰ Wood, J.; Energy Storage used for Diesel Reduction and Renewables Intergration in Remote Telecom Applications, Battcon 2015.

²⁶¹ 452 Research, Datacenter KnowledgeBase, 2017.

²⁶² Miraldi, A. et.al., Using advanced Technologies in the next generation of high power density telecommunications facilities, Battcon-Stationary Battery Conference 2012.

4C) sind teuer und haben aufgrund der erhöhten Beanspruchung eine geringere Lebensdauer. Langsame Speicher (z. B. 1/4C) sind billiger und haben aufgrund der geringeren Beanspruchung eine höhere Lebensdauer.²⁶⁷

- Umweltbedingungen: Speicher, die in Umweltschutzgebieten aufgestellt werden, dürfen z. B. keine schädlichen Materialien enthalten. Einige Speicher in heißen Umgebungen benötigen z. B. eine Klimaanlage zur Regulierung der Arbeitstemperatur etc.

Im nächsten Schritt sollten Eingangsparameter, wie Betrachtungszeitraum, Preisänderungsraten, Kalkulationszinssätze etc., festgelegt werden. Mit der Annuitätenmethode werden in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2067 im nächsten Schritt sowohl die Vollkosten, als auch die kapital- und betriebsgebundene Kosten der Speicheranlage ermittelt, um darauf aufbauend die Speicherkosten zu berechnen. Somit wird eine bessere Vergleichbarkeit verschiedener technologischer Batteriespeichersysteme erhalten. Abbildung 5.6 bietet einen Überblick für die wichtigsten Kriterien zur Speicherauswahl.

5.3 Power-to-X

Power-to-X (P2X) ist ein technologischer Ansatz und zugleich eine Flexibilitätsoption, die beim Speichern und Nutzbarmachen überschüssiger Energie die Energiewende tatkräftig unterstützen wird und im Bereich der Sektorenkopplung ein zentrales Element ist.²⁶⁸

Unter P2X werden verschiedene Verfahren zusammengefasst, bei denen temporäre oder örtliche Stromüberschüsse („Power“) in eine andere Energieform umgewandelt oder zur Herstellung eines Energieträgers („X“)

genutzt werden, welcher Energie so bindet, dass diese auf Abruf wieder zur Verfügung steht oder zur Wertschöpfung genutzt werden kann. Für die verschiedenen Sektoren, stehen verschiedene Strategien zur Verfügung (siehe Abschnitt 3.4.5). Im Folgenden soll jedoch exemplarisch nur Power-to-Gas näher betrachtet werden, da diese Technologie für Thüringen zukünftig am ehesten eine Rolle spielen könnte.

5.3.1 Markt

Power-to-Gas ist einer der ersten P2X-Strategien und Deutschland hat sich in der Kerntechnologie (der Elektrolyse) eine Führungsrolle gesichert. Für die Herstellung von bspw. strombasierten Wasserstoff können verschiedene Ansätze verfolgt werden, wie z. B. die Membran-Elektrolyse (PEM), die alkalische Elektrolyse, die Hochtemperatur-Elektrolyse oder auch die membranlose Elektrolyse. Strombasiertes Methan (synthetisches Erdgas) ist dabei ein der Membran-Elektrolyse nachgeschalteter Prozessschritt, bei dem die Weiterverarbeitung von Wasserstoff unter Zufuhr von Kohlendioxid erfolgt. Power-to-Gas Anlagen sind stets Spezialanfertigungen, deren Projektkosten sich meist im Millionen Bereich bewegen²⁶⁹ und bei denen das kW, je nach Verfahren, von 2.000 bis zu 6.000 Euro kosten kann. Anvisiert sind hier Kosten von 500 €/kW bis 2022.²⁷⁰ Mit einer Eingangsleistung von 1 MW und 3.500 Volllaststunden, kann solch eine Anlage ca. 715 Tonnen CO₂ pro Jahr vermeiden (bei Power-to-Liquid-Anlagen wären es etwa 511 Tonnen).²⁷¹ Enormes Potential bei der CO₂-Reduktion in industriellen Anwendungen verdeutlicht dabei Abbildung 5.7. Verschiedenste Institutionen haben sich deshalb zu Netzwerken und Plattformen zusammengeschlossen, um eine ökonomisch sinnvolle Einsetzbarkeit der P2X-Technologien zu entwickeln und nachzuweisen.²⁷²

²⁶⁷ VDE, Kompendium: Li-Ionen-Batterien, 2015.

²⁶⁸ Sterner, M., et al., Notwendigkeit und Chancen für Power-to-X-Technologien, 2017.

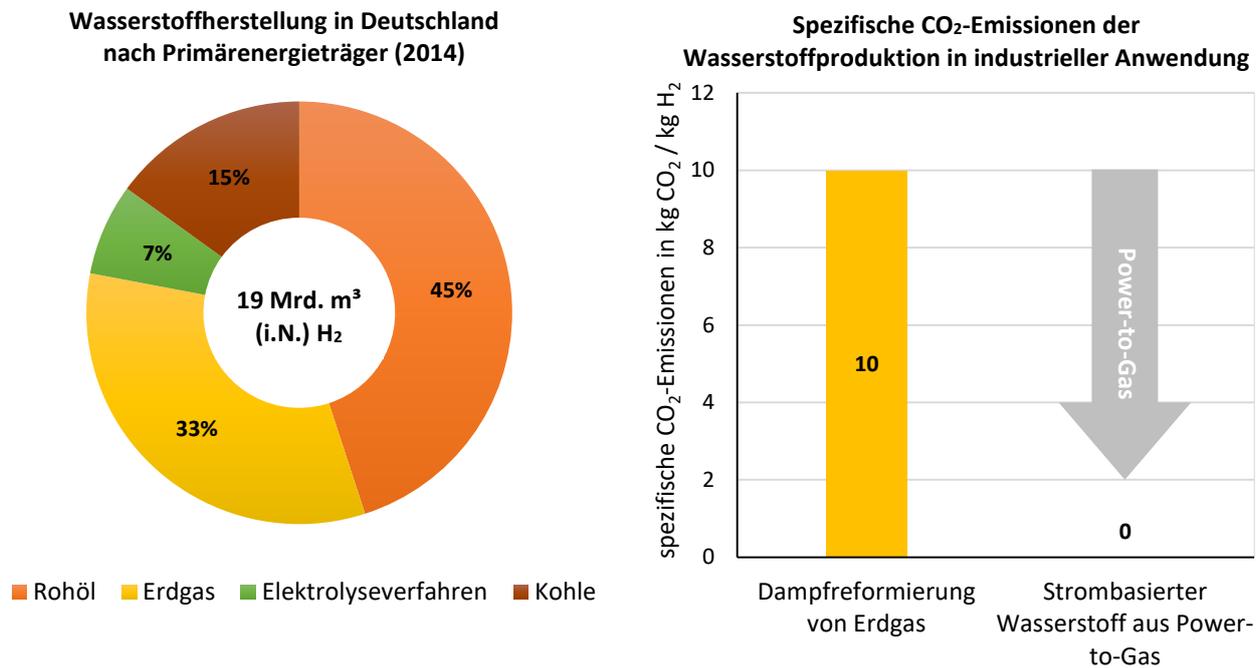
²⁶⁹ Bsp.: Förderprojekt „WOMBAT“, 5,5 Mio. €. Quelle: Götze, T., Die Audi-e-gas-Anlage in Werlte – Niedersächsische Energietage, 2017.

²⁷⁰ <http://www.powertogas.info/power-to-gas/power-to-gas-produkt-wasserstoff/umsetzungsstand-bei-wasserstoff/> (Zugriff: 29.08.2018).

²⁷¹ <http://www.energiate-messenger.de/news/178865/power-to-x-allianz-praesentiert-markteinfuehrungsprogramm> (Zugriff: 29.08.2018).

²⁷² u. a. dena PtG Plattform, Performing Energy, Kopernikus-Projekt, Power-to-X for Applications (P2X4A), Power-to-X Allianz etc.

Abbildung 5.7. Emissionsintensität der Wasserstoffherstellung in Deutschland und spezifische Emissionen der Wasserstoffherstellung aus Power-to-Gas und mittels Dampfreformierung von Erdgas.



Quelle: Eigene Darstellung nach Deutsche Energie-Agentur (2016)²⁷⁵

Mittlerweile gibt es eine global installierte Leistung von ca. 30 MW, die sich auf 32 Anlagen²⁷³ (24,5 MW) in Deutschland und 15 weitere weltweit verteilt. Abbildung 5.8 zeigt dabei deutlich, dass Deutschland der sogenannte „Hotspot“ bei P2G-Anlagen ist. In Planung stehen Anlagen mit einer Leistung von 3,7 MW (BRD) und rund 15,7 MW weltweit.²⁷³ Laut der Strategieplattform Power-to-Gas befinden sich derzeit (August 2018) in den Bundesländern Berlin, Bremen, Saarland und Thüringen weder P2G-Anlagen, noch sind P2G-Anlagen im Bau oder in Planung.²⁷⁴ Abbildung 5.8 zeigt Standorte von geplanten und bereits fertiggestellten Power-to-Gas-Anlagen in Europa.

5.3.2 Potentiale

Das Umweltbundesamt (UBA) leitet einen Bedarf zur Technologieentwicklung und „frühzeitigem Einsatz“ bereits für heute ab und rechnet mit einer breiten Markt-

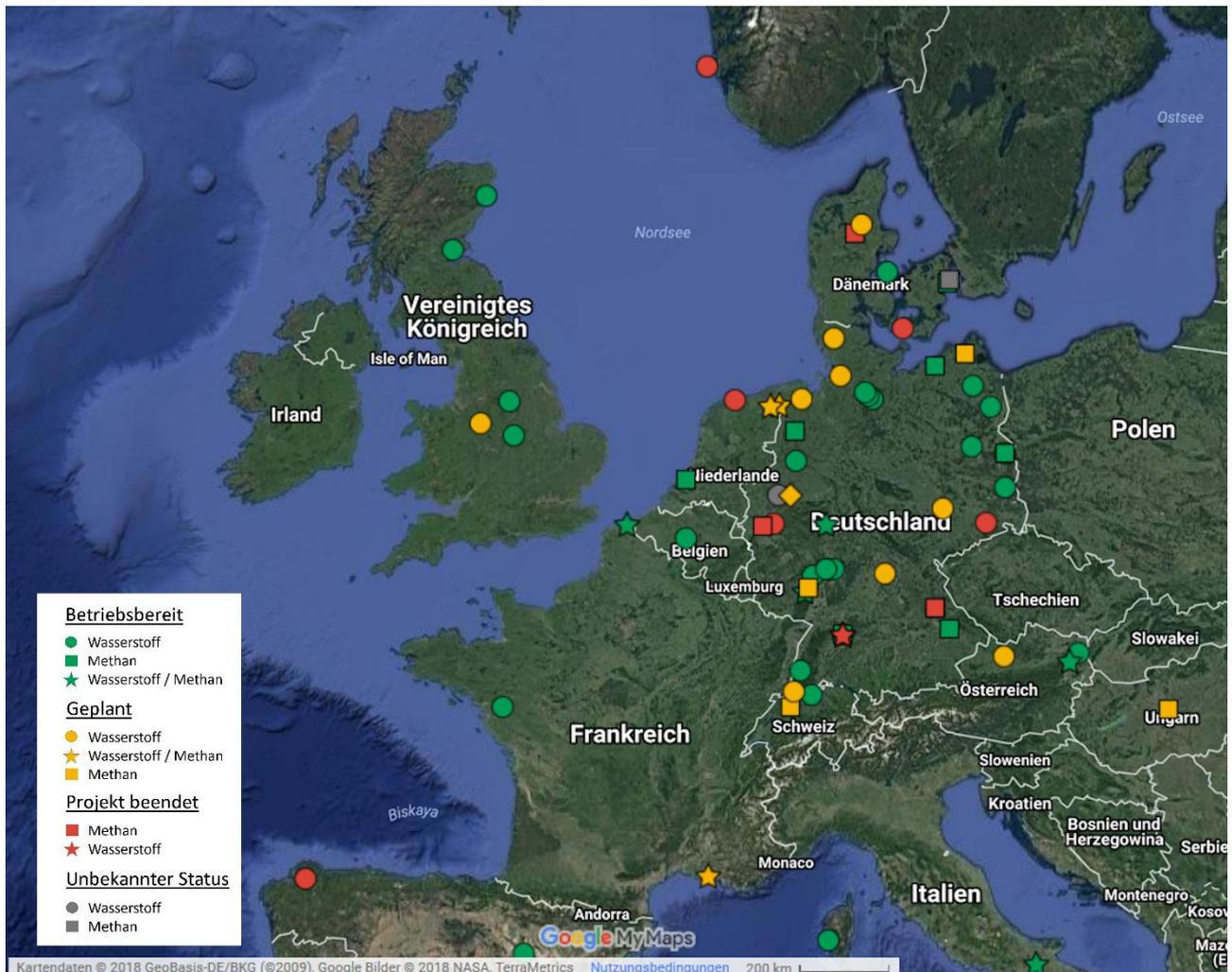
durchdringung in allen Anwendungsbereichen zwischen 2030 und 2040.²⁷³ Als möglicher Garant zur Dekarbonisierung mittels Power-to-Gas zählen dabei:

- lokale Netzengpässe,
- höhere Kosten für CO₂-Zertifikate,
- die rechtlich-regulatorische Einordnung als Letztverbraucher,
- Flottenemissionsvorgaben für die Automobilindustrie,
- eine Erhöhung der zulässigen Wasserstoffanteile im Gasnetz (Power-to-Hydrogen),
- der Einsatz als zuschaltbare Last gemäß EEG 2017.

Ein Vergleich aus verschiedenen Studien gibt einen maximalen Leistungsbedarf für die drei wichtigsten P2X-Sektoren Verkehr, Chemie und Strom von 328 GW an. Die Minimalwerte belaufen sich auf 100 GW (ohne

²⁷³ Sterner, M., et al., „Notwendigkeit und Chancen für Power-to-X-Technologien“, 2017.

²⁷⁴ <http://www.powertogas.info/> (Zugriff: 29.08.2018).

Abbildung 5.8. Projektstandorte von Power-to-Gas-Anlagen in Europa.

Quelle: <http://www.europeanpowertogas.com>

Power-to-Heat).²⁷³ Die Deutsche Energie-Agentur GmbH schätzt für den Verkehrs- und den Chemiesektor das größte Potential ein. Für diese befinden sich entsprechende P2X-Technologien aus heutiger Sicht auch am nächsten am Markteintritt.²⁷⁵ Der Chemiesektor bietet mittels Power-to-X-Technologien die Möglichkeit viele wichtige Grundstoffe klimaneutral herzustellen. Zu diesen Grundstoffen zählen:

- Ethylen (Ethen), die mengenmäßig meistproduzierte organische Grundchemikalie in Deutschland

(5,1 Mio. t/a) wird bspw. zu einem hohen Anteil für die Herstellung von Kunststoffen verwendet; Ammoniak (2,5 Mio. Tonnen pro Jahr) wird aus Stickstoff und Wasserstoff hergestellt und ist Grundchemikalie aller stickstoffhaltigen Verbindungen (z. B. Salpetersäure, Harnstoff und Dünger);

- weitere Stoffe wie Essigsäure und Formaldehyd (aus Methanol) oder Feinchemikalien.²⁷⁶

Wird dem Stromsektor ein vollständiger Netzausbau zugrunde gelegt (Marktintegration), ist bis zum Jahr 2035

²⁷⁵ Deutsche Energie-Agentur (2016), „Potenzialatlas Power to Gas – Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen“.

²⁷⁶ Sterner, M., et al., „Notwendigkeit und Chancen für Power-to-X-Technologien“, 2017.

kaum ein marktbasierter Einsatz von Power-to-Gas zu sehen. Bei einem verzögerten Stromnetzausbau (Netzintegration) werden bis 2035 ca. 30 GW installierte netzdienliche Power-to-Gas Kapazitäten benötigt. Bei hohen EE-Anteil von 80 bis 95% im Strommix zeigen sich Kapazitäten von bis zu 40 GW, während in einem 100% regenerativen Stromsystem die erforderliche Power-to-Gas Leistung (Einspeicherung) bei ca. 44 GW liegt.

Tabelle 5.1 fasst die potentiell wichtigsten Einsatzgebiete von Power-to-Gas-Technologien zur Herstellung von Wasserstoff und Methan zusammen.

5.3.3 Herausforderungen

Nur die technologieoffene Umsetzung aller P2X-Aktivitäten über die Sektoren Energie, Industrie, Verkehr, Landwirtschaft und Gebäude hinweg kann Optimierungspotenziale heben. Für die Power-to-Gas Strategie muss vor allem auf die für die Einspeisung von regenerativ erzeugten Wasserstoff in das Erdgasnetz vorhandenen Restriktionen geachtet werden. Nach DIN 51624 liegt der Grenzwert für Wasserstoff bei 2 Vol.-%. Bei Verwendung von Gasturbinen mit schadstoffarmen Vormischbrennern limitieren Hersteller den Wasserstoff-Anteil auf 1 bis 5 Vol.-%.²⁷⁷ Einen weiteren limitierenden Faktor stellen die aktuell (noch) hohen spezifischen Investitionskosten und die geringen Wirkungsgrade dar. Nach der Rückverstromung stehen so z. B. nur 30 bis 40% der ursprünglich eingesetzten Energie zur Verfügung.²⁷⁸ Sobald Power-to-Gas sinnvoll betrieben werden kann (u. a. durch den Wegfall des Status als Letztverbraucher) können mit P2G-Anlagen in größeren Stückzahlen die Kosten für synthetisches Erdgas (inklusive

Steuern) auf bis zu 14 bis 15 Cent pro Kilowattstunde gesenkt²⁷⁹ und somit ein konkurrenzfähiges Produkt geschaffen werden.

Tabelle 5.1. Auswahl der Einsatzgebiete für Power-to-Gas Endprodukte.

Power-to-Hydrogen	Power-to-Methan
Einspeisung in das Erdgasnetz (Volumenanteil ist begrenzt)	Rückverstromung in bestehenden Gaskraftwerken
Industriesektor (v.a. Ammoniak-, Stahl- und Methanolherstellung sowie in Raffinerien)	Unlimitierte Einspeisung in das Erdgasnetz
Rückverstromung in Brennstoffzellen oder als Erdgas-Wasserstoffgemisch in Gaskraftwerken	Multiple Anwendung in allen Sektoren, in welchen bereits heute konventionelles Erdgas verwendet wird (ohne Anpassung der Anlagen- & Gerätetechnik)
Verkehrssektor (Brennstoffzellenfahrzeuge auf der Straße oder Schiene)	
Wärmesektor (stationäre Brennstoffzellen)	

Quelle: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Kurzstudie Power-to-X, 2017

²⁷⁷ Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Kurzstudie Power-to-X, 2017.

²⁷⁸ <https://www.oeko.de/presse/archiv-pressemitteilungen/2014/power-to-gas-kein-allheilmittel-fuer-den-klimaschutz/> (Zugriff: 29.08.2018).

²⁷⁹ <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/synthetische-kraftstoffe-hoffnungstraeger-fuer-ein-auslaufmodell-a-1125709.html> (Zugriff: 29.08.2018).

6 Brancheneinschätzung aus Expertensicht

Um differenzierte und ausführliche Einschätzungen insbesondere zur Sammlung von Hintergrundinformationen und detaillierten Inhalten von spezifischem Vorgehen zu erlangen, wurden 17 leitfadengestützte Experteninterviews durchgeführt. Die Experten, deren Aussagen für diese Studie anonymisiert wurden, sind vorwiegend aus Thüringen. Sie setzen sich überwiegend aus Unternehmen, Bildungs- und Forschungseinrichtungen sowie aus einer Bank/Versicherung und einem Bundesverband zusammen (Abbildung 6.1). Dabei wurde die gesamte Wertschöpfungskette von der Forschung bis in den Markt durch die Interviewteilnehmer abgebildet.

6.1 Standort Thüringen

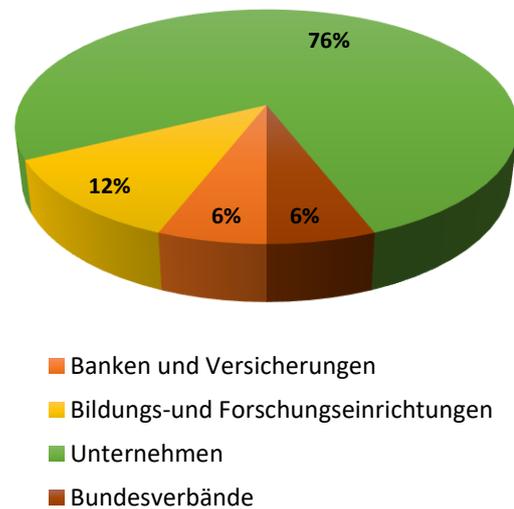
6.1.1 Vor- und Nachteile des Standortes Thüringen

Vorteile des Standortes Thüringen werden generell von etwa einem Dreiviertel der Experten in der zentralen Lage innerhalb Deutschlands und Europas gesehen. Die verkehrstechnische Anbindung an das Autobahn- und Zugnetz wird vorwiegend als äußerst positiv betrachtet. Somit entsteht ein Logistikvorteil z. B. in Bezug auf den Transport von Materialien und (Zwischen-)Produkten sowie die kurzen Wege zu Projekt- und Kooperationspartnern, wodurch u. a. die kooperative Vernetzung innerhalb und außerhalb Thüringens erhöht wird.

Eine Vielzahl der Befragten bewertet sowohl die aktuelle Forschungslandschaft im Freistaat Thüringen im Bereich der Energiespeicherung, sowie die Qualifikation der Facharbeiter als vorteilig. Ein hohes Know-how ist in Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen vorhanden.

Die positive Entwicklung der Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien bzw. die Energieverteilungsstruktur wurde von einem geringen Teil der Befragten hervorgehoben. Durch die volatile Natur erneuerbarer und den Abbau konventioneller Energieerzeugung steigt der Be-

Abbildung 6.1. Verteilung der befragten Experten nach Branchen.



Quelle: Experteninterviews, Eigene Erhebung (ThEEN)

darf an Energiespeichern. In Zukunft soll sich laut Koalitionsvertrag der Landesregierung vom 20.11.2014 der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch bis 2020 auf 35% erhöhen. Im Jahr 2040, soll der Freistaat bereits seinen Eigenenergiebedarf bilanziell durch einen Mix aus 100% regenerativer Energie selbst decken können. Mit diesen Zielvorgaben strebt Thüringen eine weitaus schnellere Umsetzung der Energiewende an, als von der Bundesregierung vorgesehen. Aus Expertensicht wurde in diesem Zusammenhang die langjährige Wasserkraftnutzung und das Potential der Pumpspeicherkapazitäten in Thüringen als sehr vorteilhaft hervorgehoben. Als weiterer Vorteil wurde von ca. einem Drittel der Experten ferner die hohe Dialogbereitschaft von Politik und Fördermittelgebern genannt. Vereinzelt wurde angemerkt, dass vorhandene Förderformate gut zu den Thüringer Unternehmensstrukturen passen. Wie bereits erwähnt, ist der politische Wille stark ausgeprägt, die Energiewende – insbesondere bezogen auf die Energiespeicherung – voranzutreiben. Dank kleiner Strukturen innerhalb des Bundeslandes

Tabelle 6.1. Vor- und Nachteile des Standortes Thüringen aus Sicht der Thüringer Experten.

Vorteile	Nachteile
Zentrale Lage	Kleinteilige Unternehmensstruktur
Verkehrsanbindung	Abwanderung der Produktion
Grundlagenforschung und angewandte Forschungslandschaft	Mangelnde Praxiserprobung
Qualifikation der Facharbeiter	Spezialisierung der Studiengänge
Energieerzeugung (Anteil EE)	Akzeptanz und Verständnis
Politiknähe	
Netzwerkstrukturen	

Quelle: Experteninterviews, Eigene Erhebung (ThEEN)

wird dabei die Flexibilität innerhalb dieses Prozesses erhöht. Aus Expertensicht ist zudem die Thüringer Netzwerkstruktur, welche bereits im Abschnitt 4.3 diskutiert wurde, positiv zu erwähnen.

Als nachteilig bewertet mehr als die Hälfte der Experten, dass in Thüringen keine ausgeprägten Unternehmensstrukturen für die Energiespeicherung existieren. Großunternehmen fehlen fast vollständig (Ausnahme CATL), die technologische Innovationen voranbringen können. Vielen Unternehmen – insbesondere den KMUs – fehlen oft die notwendigen finanziellen Ressourcen und personellen Kapazitäten um die Forschung und Entwicklung (z. B. Antragsstellung für Forschungsprojekte) oder auch die Produktion voranzutreiben. Da eine solche Unternehmensstruktur in anderen Bundesländern vorhanden ist, gehen viele Thüringer Unternehmen deswegen vorrangig Kooperationen außerhalb des Freistaates ein. In Bezug auf die Produktion der umfassenden Speichertechnologien warnen die Experten vor einer möglichen Abwanderung in asiatische Länder. Ähnlich wie bei der PV-Branche besteht die Gefahr, dass ein Großteil des

Know-hows zwar in thüringischen bzw. deutschen Unternehmen entsteht, dann jedoch mit der Produktion in asiatische Länder abwandert. China hat beispielsweise ein hohes Lithium-Vorkommen, was für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien als der aktuell am weitesten kommerzialisierten Akkumulator-Technologie benötigt wird.

Trotz des Lobes an die Thüringer Forschungslandschaft mangelt es an Umsetzungen bzw. Anwendungen. Die Branchenexperten beanstanden die geringe Anzahl von Demonstrationsprojekten, um u. a. Prototypen in die Anwendung zu bringen und den Markt anzuregen. Allgemein ist die Einschätzung der Experten, dass die Akzeptanz in den Unternehmen und der Bevölkerung für Speichertechnologien, Netzintegration und weitere speicherrelevanten Themen gestärkt werden muss. Ein proaktives Zugehen auch auf die Netzbetreiber erscheint sinnvoll zu sein, um so die Anwendung von Speicherlösungen zu erhöhen. Einzelne Experten schätzen die in Thüringen angebotenen Studiengänge in Bezug auf Energiespeicherung als nicht tiefgehend genug ein. Eine Spezialisierung der Studiengänge und eine stärkere Kooperation der Fachhochschulen bzw. Universitäten untereinander wird gewünscht.

6.1.2 Rolle des Freistaates

Der Freistaat Thüringen, die Landesentwicklungsgesellschaft Thüringen (LEG) und die Thüringer Aufbaubank (TAB) unterstützen die Entwicklung der Energiespeicherbranche im Freistaat. Obwohl es vereinzelt als positiv angesehen wurde, dass vorhandene Förderformate gut zu den Unternehmensstrukturen passen, wurde das Fehlen weiterer spezifischer Förderprogramme neben den Förderinstrumenten der Thüringer Innovationsstrategie (RIS3 Thüringen) kritisiert. Angelehnt an die Thüringer Innovationsstrategie (RIS3 Thüringen) erfolgen z.B. Ausschreibungen der Thüringer Aufbaubank zu Forschungsvorhaben. Hierzu wurden u. a. Anschubförde-

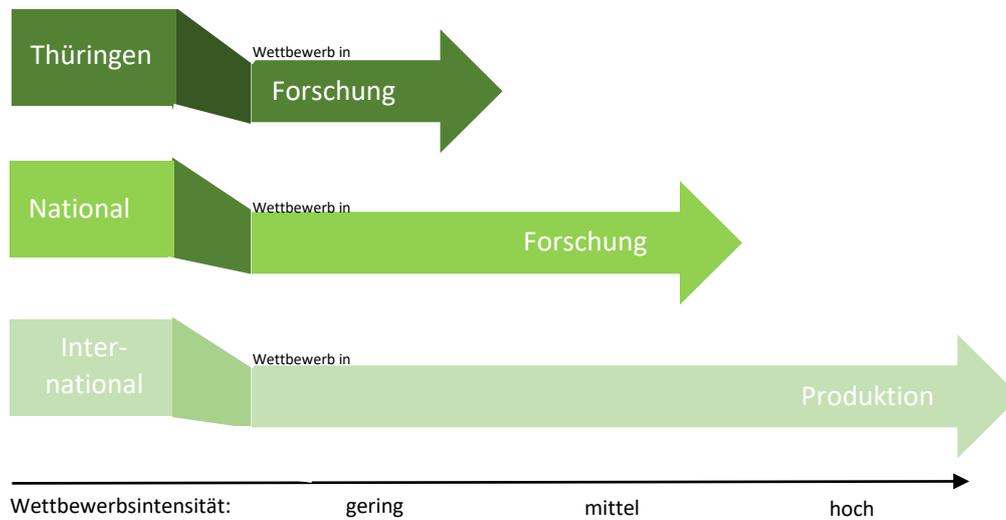
rungen für Energiespeichertechnologien oder Firmenansiedelungen (z. B. im Rahmen von Anschaffungskosten) und Förderungen im Bereich der Umsetzung von Demonstrationsprojekten als Verbesserungspotenziale genannt. Ferner wird von einem sehr geringen Teil der befragten Experten kritisiert, dass sich der Freistaat zu oft auf die Thüringer Städtekette konzentrierte und Randregionen wie Nord- oder Südthüringen benachteiligt wären. Vereinzelt wurde außerdem angemerkt, dass die Gesetzgebung zu kompliziert sei, die Beantragung der Förderanträge vereinfacht und deren Bearbeitungszeit verkürzt werden müsse.

Die Unterstützung des Freistaates zielt auch auf die Verbesserung der regulatorischen Rahmenbedingungen auf Bundesebene ab. Das deutsche Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG) wurde kontrovers diskutiert. Nicht nur die für die Studie befragten Experten betonen das Ausbremsen der Energiewende durch das EEG sondern auch das TMUEN sowie weitere deutsche Umweltministerien: „Die Eckpunkte für die (anstehende) Novelle des EEG sind geprägt von dem Geist, die Energiewende scheitern zu lassen. Nicht der CO₂-Ausstoß wird gedeckelt, sondern der Ausbau der erneuerbaren Energien – Klimaschutz, Arbeitsplätze und Innovationsfähigkeit eines dynamischen Sektors werden gefährdet“.²⁸⁰ Zu intensive Umlagen und Netzentgelte sowie weitere Festsetzungen durch das EEG erschweren somit auch den Ausbau der Speicherbranche in Thüringen. Einer der Experten hat beispielsweise im Zuge der nächsten EEG-Novelle vorgeschlagen, ein besonderes Augenmerk auf die steuerliche Benachteiligung zu legen, um somit u. a. den Markteintritt der Produkte zu erleichtern. Zur Beschleunigung der Markteinführung von Speichertechnologien wurden zudem Marktanreizprogramme sowie Sensibilisierungskampagnen angeregt.

6.2 Wettbewerbssituation

Abbildung 6.2 stellt die Wettbewerbssituation aus Sicht der Thüringer Experten dar. Im Freistaat ist die Wettbewerbsintensität in Bezug auf die Energiespeicherung insgesamt gering. Hersteller von thermischen Energiespeichermaterialien, Druckelektrolyseuren, Thermobatterien etc. sind nur vereinzelt anzutreffen. Der deutsche Markt ist geringfügig größer. Thüringen, sowie Deutschland im Allgemeinen, ist in der Forschung und im Systemdenken Vorreiter, jedoch fehlt der Produktionszweig. Es ist eine Tendenz zur Abwanderung von beispielsweise Speicherherstellern nach Asien zu beobachten. International ist demzufolge gerade im Bereich Produktion eine hohe Wettbewerbsintensität zu verzeichnen. Dieser steigende internationale Wettbewerb hat u. a. eine Entwicklung hin zu Dumpingpreisen zur Folge. Insgesamt wurde während der Experteninterviews deutlich, dass Thüringen eher als Forschungsstandort und weniger als Produktionsstandort gesehen wird. Der ausgeprägte Forschungszweig in Thüringen bzw. Deutschland stellt zwar in gewisser Hinsicht einen regionalen/nationalen Wettbewerb dar, jedoch ergeben sich daraus auch Möglichkeiten zu Kooperationen. Kompetenzen können ausgebaut und Ressourcen gemeinsam genutzt werden. Um die Wettbewerbsfähigkeit der Thüringer Speicherbranche zu steigern, ist zum einen die Unterstützung des Freistaates, wie oben beschrieben, notwendig. Zum anderen muss dringend ein Markt geschaffen werden, der eine dezentrale Einbindung von Energiespeichern beinhaltet. Eine mögliche Chance am Wettbewerb teilzuhaben, stellt laut Expertenbefragung z. B. die Erforschung und Erprobung der Wasserstofftechnologie vor allem im Hinblick auf die E-Mobilität dar.

²⁸⁰ TMUEN (2016), „Positionspapier zur EEG-Novelle 2016“, <https://www.thueringen.de/th8/tmuen/aktuell/neues/88286/> (Zugriff: 29.08.2018).

Abbildung 6.2. Wettbewerbssituation aus Sicht der Thüringer Experten.

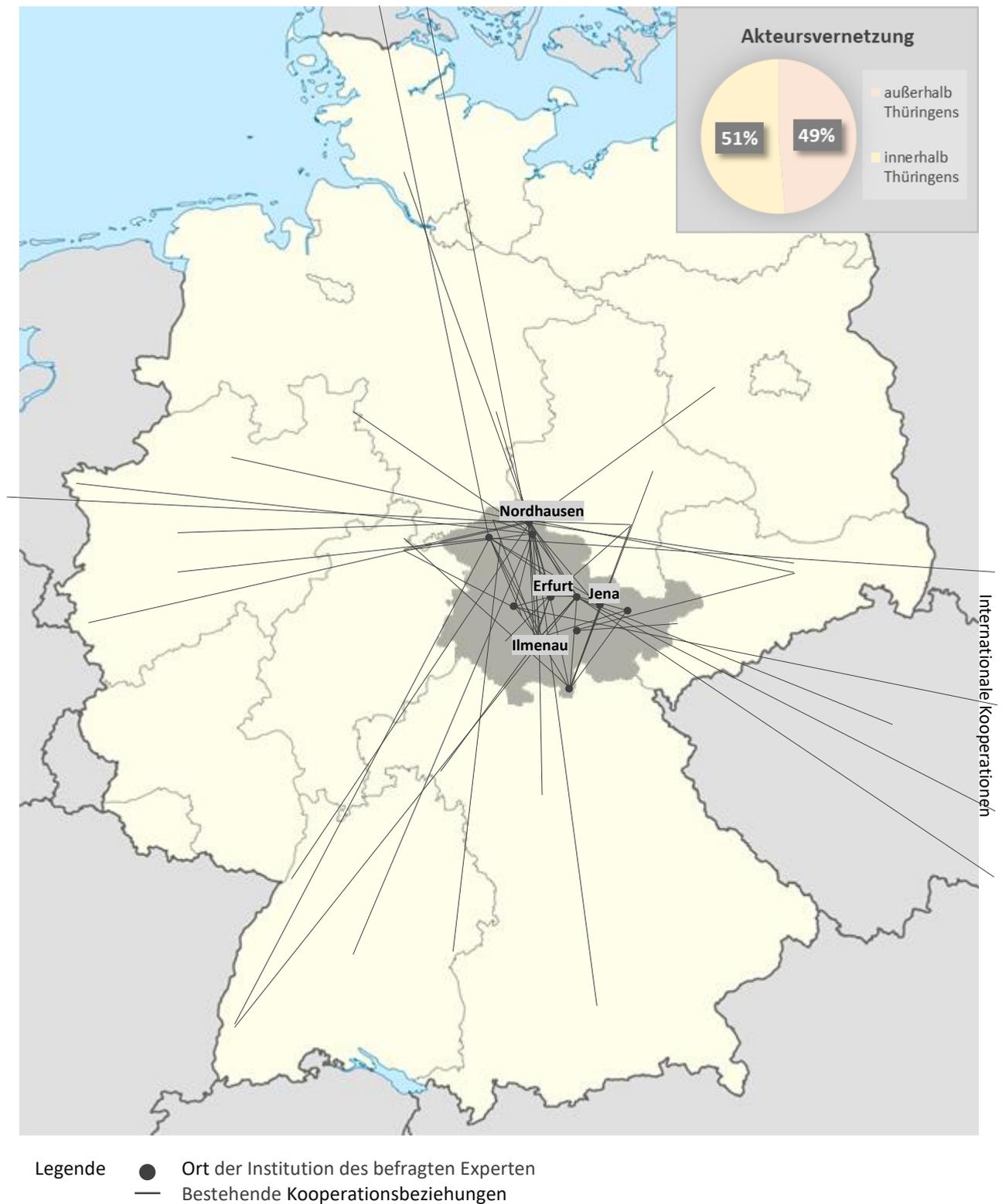
Quelle: Experteninterviews, Eigene Darstellung (ThEEN)

6.3 Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten

Thüringens Unternehmen können von einer breiten Forschungs- und Entwicklungslandschaft in Thüringen profitieren. Über 50% der Befragten geht daher Kooperationen mit Thüringer Hochschulen und Forschungseinrichtungen wie der TU Ilmenau (ThIMo), HS Nordhausen, Fraunhofer-Instituten (IOBS-AST, IKTS), IAB Weimar gGmbH, FH Erfurt, FSU Jena (CEEC Jena), Bauhaus Universität Weimar, HS Schmalkalden, isle GmbH (Steuerungstechnik und Leistungselektronik) sowie einigen anderen ein. Laut Experten konzentrieren sich die Kooperationsbeziehung räumlich hauptsächlich auf die Regionen Nordhausen und Ilmenau sowie auf die Thüringer Städtekette. Die bundesweite Vernetzung konzentriert sich auf die Bundesländer Sachsen-Anhalt (u. a. Raum Halle), Sachsen (u. a. Raum Dresden), Bayern, Baden-Württemberg, Hessen (u. a. Raum Kassel) und Nordrhein-Westfalen (siehe Abbildung 6.3).

Die befragten Thüringer Unternehmen/Institutionen sind derzeit bzw. in den kommende drei bis vier Jahren an verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten beteiligt:

- Wirkungsgradverbesserungen und Kostensenkungen von Energiespeichern;
- Materialerforschung für verschiedenste Kälte-/Wärmespeicher (z. B. sensible Wärme, Latentwärmespeicher, Thermochemische Wärmespeicher - Thermobatterien) sowie für E-Mobilität;
- Wasserstoff- und Zellbautechnologien (u. a. Verbesserung der Zellchemie, Erweiterung der Redox-Flow Batterie um Wärmespeicher);
- Hochleistungsenergiespeicher;
- Innovative Kreisprozesse auf Niedrigtemperaturniveau;
- Kombination von Speichertechnologien mit erneuerbaren Energien (z. B. geothermischer Speicher) Betriebsführung für Speichersysteme/Steuerboxen/Batteriemanagement/virtuelle Speicher;
- Speichergestützte Eigenversorgungssysteme;
- (Druck-)Elektrolyseure als Komponente für Energiespeicherlösungen;
- Netzdienlicher Einsatz von Speichern;

Abbildung 6.3. Akteursvernetzung nach Befragung der Experten in den Experteninterviews.

Quelle: Experteninterviews, Eigene Darstellung (ThEEN)²⁸¹

²⁸¹ Die dargestellte Vernetzung spiegelt lediglich die Informationen wider, die in den Experteninterviews erlangt wurden. Es wird daher kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

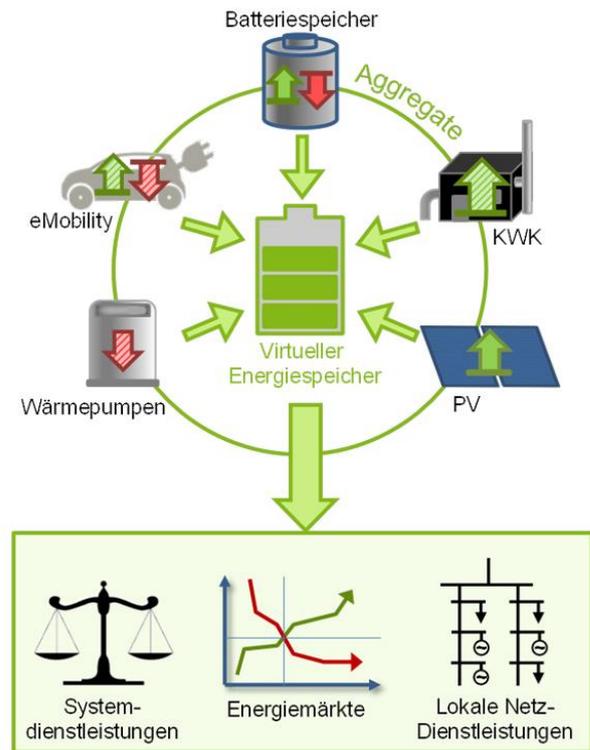
- Verkehrssektor: E-Mobilität (Superkondensator-, Batterie- und Wasserstofftechnologien) und Zugverkehr (Nickel-Cadmium Batterien);
- Herstellungs- und Zulassungsüberwachung von Batterien, Brandschutz von Speichern;
- Blockchain;
- Sektorenkopplung;
- Wiederverwendung / Recycling von Batterien.

Ziel ist schließlich die Anwendung bzw. der Markteintritt der unterschiedlichen Dienstleistungen und Produkte. Im Rahmen dessen wurde jedoch von den Experten angemerkt, dass die Produktion als Unternehmensbereich innerhalb des Freistaates fehlt. Thüringen wird als „verlängerte Werkbank“ angesehen, da die Unternehmen oft nur als Zulieferer agieren und keine Produkttiefe gewährleistet wird.

6.4 Geschäftsmodelle

Ansätze für neue Geschäftsmodelle (siehe Kapitel 5) sehen die Experten im Rahmen der Entwicklung eines Regelenergiemarktes, der Energieautarkie und der Vermietung von Speichern. Systemdienstleistungen, die von Speichern erbracht werden, gelten ebenfalls als wichtige Geschäftsmodelle. Beispielsweise können mit Hilfe virtueller Speicher Prosumer (Haushalte, KMUs), welche keine Speichermöglichkeit haben, den erzeugten Strom in das Netz bzw. in vorhandene Speicherkraftwerke der Energiewirtschaft einspeisen (siehe Abbildung 6.4). Virtuelle Speicherkraftwerke können am Großhandelsenergiemarkt teilnehmen und für die Systemdienstleistungen Erlöse erzielen, wodurch sich ein Geschäftsmodell etablieren kann.²⁸² Ebenfalls am Regelenergiemarkt teilnehmen können E-Fahrzeuge. Durch gezieltes Be- und Entladen der Fahrzeugbatterien (Vehicle-to-Grid) können Erlöse erwirtschaftet werden. Potential für Geschäftsmodelle bietet auch die Wasserstofftechnologie.

Abbildung 6.4. Das Prinzip virtueller Speicher.



Quelle: TU Dortmund²⁸²

Wasserstoff als Energieträger für den Verkehr von Morgen erfordert ein H₂-Tankstellennetz, welches weder in Thüringen noch Deutschland oder Europa ausgebaut ist. Neben den bereits angeführten gilt das Energieleasing von Speicherkapazitäten als weiteres Geschäftsmodell. In einigen Bundesländern existiert dieses Modell bereits, in Thüringen besteht dahingehend Aufholbedarf. Viele Experten betonen jedoch, dass die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle durch schwierige Randbedingungen, wie z. B. die EEG-Umlage oder fehlende Präqualifikationen, erschwert werden. Die rechtmäßige Betreuung von Speichern, Netznutzungsgebühren, Umgang mit Mieterstrommodellen und andere ungeklärte rechtliche Fragen hemmen die Umsetzung von Geschäftsmodellen.

²⁸² FIZ Karlsruhe – Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH (2017), http://forschung-energiespeicher.info/waerme-speichern/projektliste/projekt-einzelsicht//Die_Stadt_als_Speicher/ (Zugriff: 31.08.2018).

6.5 Entwicklungstendenzen

Die befragten Experten sind sich einig, dass die Bedeutung der Energiespeicherung zukünftig zunehmen wird. Uneinigkeit herrscht bei der Frage nach den primären Einsatzmöglichkeiten von Speichern und auch welche der verschiedenen Technologien sich an den Märkten etablieren werden.

Die Mehrheit der befragten Experten ist der Ansicht, dass die Wasserstofftechnologie zukünftig an Bedeutung gewinnen sollte und dies auch tun wird. Ein Viertel der Befragten ist sogar der Meinung, dass sie der Schlüssel für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende sein kann. Die Erforschung und Erprobung der Technologie sowie die Anwendung in Industrie, Unternehmen, Haushalten und im Verkehrssektor gewinnt zunehmend an Bedeutung.

Im Verkehrssektor tritt das wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeug in Konkurrenz zu dem batteriebetriebenen Elektrofahrzeug. Letztere haben den Vorteil, dass sie nahezu überall aufgeladen werden können, wo Strom zur Verfügung steht. Die Infrastruktur ist in Form des Stromnetzes bereits prinzipiell vorhanden und die entsprechenden Ladestationen können installiert werden. Dagegen ist kein effektiv nutzbares Netz an Wasserstofftankstellen in Thüringen/Deutschland vorhanden bzw. muss mit hohen Investitionskosten etabliert werden. Technologische Unterschiede bestehen ferner bei der Auflade-/Betankungszeit. Während Batterien von Fahrzeugen z.T. über Stunden aufgeladen werden müssen, dauert das Betanken mit Wasserstoff nur wenige Minuten.

Im Bereich der E-Mobilität sehen die Experten zudem ein Entwicklungspotential beim induktiven Laden, der Verbesserung der Reichweite und der Zyklenstabilität. Als Herausforderung wird die Netzüberlastung, auf-

grund von Spitzenladezeiten oder der vermehrten Nutzung von Superchargern (Schnelladestationen) gesehen. Trotz dieses Nachteils können sich die E-Fahrzeuge im Gegensatz dazu zukünftig auch als temporäre Batteriespeicher entwickeln. Im Durchschnitt steht ein Fahrzeug während 23 Stunden des Tages.²⁸³ Die in der Fahrzeugbatterie gespeicherte Energie kann bei erhöhtem Energiebedarf wieder in das öffentliche Stromnetz (Vehicle-to-Grid) rückgespeist oder für den privaten Stromverbrauch (Vehicle-to-Home) genutzt werden (Rückverstromung).

Im Allgemeinen plädieren die Experten für eine dezentrale elektrische als auch thermische Speicherlösung. Die lokale Erzeugung von Strom und Wärme kann nur mit Hilfe von lokaler Speicherung möglichst vollständig vor Ort verbraucht werden. Eine fluktuierende erneuerbare Energieerzeugung kann somit ausgeglichen und stabilisiert bzw. industrielle Abwärme oder Warmwasser genutzt werden. Die dezentral erzeugte Energie intelligent zu vernetzen, stellt eine weitere Entwicklungstendenz dar. Die Anwendung sogenannter Schwarmpeicher oder die bereits im Abschnitt 6.4 zu den Geschäftsmodellen erläuterte virtuelle Energiespeicherung können die Teilnahme am Regelenergiemarkt revolutionieren. In Bezug auf die erneuerbare Energiegewinnung kann die einfachste und älteste Weise Strom zu erzeugen stärker berücksichtigt werden, so die Experten. Thüringen bietet gute Bedingungen für Wasserkraft im Sinne von Pumpspeicherkraftwerken. Zum dezentralen Speichern von Strom tragen auch kleine Pumpspeicherkraftwerke bei, was sie für die Stromgewinnung aus erneuerbaren Energien interessant macht. Ferner wird laut den interviewten Experten die oberflächennahe und tiefe Geothermie für die Wärme- und Kältespeicherung zukünftig eine entscheidende Rolle spielen.

²⁸³ Mobility House GmbH (2017), https://www.mobilityhouse.com/de_de/vehicle-to-grid (Zugriff: 29.08.2018).

Trotz ausgeprägter Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Thüringen und in anderen Bundesländern haben bisher erst wenige Speichertechnologien die notwendige technologische Reife zu wettbewerbsfähigen Kosten erreicht. Neben der Kostensenkung gelten eine höhere Energiedichte sowie eine effiziente Betriebsweise unter Zuhilfenahme intelligenter Managementsysteme als weitere wichtige Entwicklungstendenzen. Im Zuge technologischer (Weiter-)Entwicklungen können bestehende Wertschöpfungsketten ausgebaut und neue etabliert werden.

7 Zusammenfassung

Dieses Kapitel soll eine überblicksartige Zusammenfassung der vorliegenden Studie zu den „Forschungs- und Entwicklungspotenzialen der Thüringer Energiespeicherbranche“ bieten.

7.1 Rahmenbedingungen für die Energiewende in Thüringen

Während die Bundesregierung bis 2050 den Ausbau erneuerbarer Energien auf einen Anteil von 60% am Bruttoendenergieverbrauch bzw. mindestens 80% am Bruttostromverbrauch anvisiert, strebt die thüringische Landesregierung für 2050 eine 100-prozentige bilanzielle Deckung des Primärenergieverbrauchs aus erneuerbaren Energiequellen an. Dieses klimapolitische Ziel setzt den groben politischen Rahmen für die Energiewende in Thüringen. Derzeit wird zudem in einem öffentlichen Diskurs eine „Integrierte Energie- und Klimaschutzstrategie (IEKS)“ erarbeitet, die weitere Details der klimapolitischen Rahmenbedingungen festlegen wird. Wird der aktuelle Primärenergieverbrauch Thüringens (Stand: 2014) betrachtet, so wird deutlich, dass der Freistaat mit einem Anteil von 23,1% gegenüber dem Bund (11,5%) bereits einen vergleichsweise sehr hohen Anteil erneuerbarer Energien aufweist. In Bezug auf die Bruttostromerzeugung liegt der Anteil sogar bereits bei knapp 55%. Gut jede zweite in Thüringen erzeugte Kilowattstunde stammt also aus erneuerbaren Energiequellen. Jedoch muss ebenfalls erwähnt werden, dass Thüringen seinen Strombedarf nur zu etwa 67% selbst decken kann und damit etwa ein Drittel des verbrauchten Stroms importiert werden muss. Unter den erneuerbaren Energieträgern hat Biomasse sowohl im Primärenergieverbrauch (78%), als auch in der Bruttostromerzeugung (40%) einen erheblichen Anteil.

Strukturell wird die erhebliche Integration erneuerbarer Energieträger in die bestehenden Energienetze zu einer

Tabelle 8.1. Beispielhafte Einsatzmöglichkeiten von Speichern in einem dezentralen Energienetz.

Sektor	Einsatzmöglichkeiten
Strom	Spannungsregelung, Frequenzhaltung, Spitzenkappung, Schwarzstartenergie, Inselnetze, Effizienzsteigerung bei Stromgewinnung
Wärme	Entkopplung von Strom- und Wärmege-winnung in KWK-Anlagen, Effizienzsteigerung bei Wärmege-winnung, Power-to-Heat
Gas	Spitzenkappung, Langzeitspeicher (Power-to-Gas), Speicher für Erdgasauto, Effizienzsteigerung, Power-to-Gas
Verkehr	Alternative Kraftstoffe über Power-to-X, Batteriespeicher für E-Autos, E-Autobatterien als dezentrale netzdienliche Speicher, Speicher für Ladestationen zur Netzentlastung

Quellen: Siehe Fußnoten⁴⁵⁻⁵⁴

starken Dezentralisierung führen. Diese bringt erhöhte Anforderungen an die Netze mit sich, da sowohl räumliche Unterschiede als auch zeitliche Verschiebungen zwischen Regionen bzw. zeitlichen Perioden mit hoher Energiegewinnung und hohem Energieverbrauch ausgeglichen werden müssen. Um dennoch die Versorgungssicherheit in allen Energiesektoren zu gewährleisten, bedarf es an neuen Flexibilitätsoptionen. Neben dem Netzausbau, der vor allem den Ausgleich der räumlichen Unterschiede adressiert, werden Energiespeicher voraussichtlich eine maßgebliche Rolle für die Realisierung der Energiewende spielen. Tabelle 8.1 zeigt dabei zusammenfassend beispielhafte Einsatzmöglichkeiten von Energiespeichern in einem dezentralen Energienetz. Obwohl Thüringen schon lange ein Standort für einige der größten Pumpspeicherkraftwerke Deutschlands ist, genügen die vorhanden Speicherkapazitäten (Tabelle 8.2) bei weitem nicht, um den Bedarf an Speicherkapazitäten für eine erfolgreiche Energiewende zu decken.

Tabelle 8.2. Bekannte Speicherkapazitäten in Thüringen.

Sektor	Speicherkapazität insgesamt
Strom	12,118 GWh
Wärme	0,730 GWh
Gas	2.470 GWh
Verkehr	0,003 – 0,006 GWh

Quellen: Siehe Fußnoten⁴⁵⁻⁵⁴

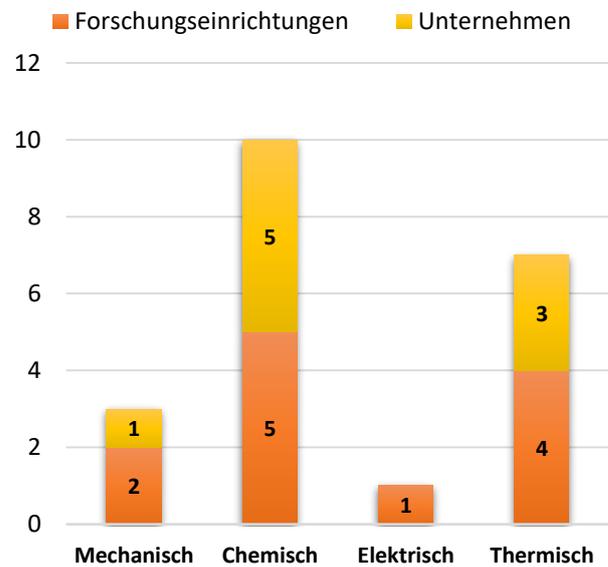
7.2 Forschungsaktivitäten, Wertschöpfungsketten und Branchenstrukturen

Es wurde ein Überblick über die bekannten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Thüringen erstellt, sowie die Branchenstrukturen und Wertschöpfungsketten mit Hinblick auf Unternehmens-, Forschungs- und Netzwerkstrukturen untersucht. Für die Untersuchung der Branchenstrukturen wurden Daten ausschließlich für den Strom- und Wärmesektor gesammelt.

7.2.1 Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten

Im Freistaat wurden die im Energiespeicherbereich bekannten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von Unternehmen sowie Forschungsinstituten und Hochschulen zusammengetragen. Letztere wurden im gegebenen Projektrahmen so sorgfältig wie möglich recherchiert. Allerdings kann hier kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden, da zum einen die hohe Anzahl kleiner und mittelständischer Unternehmen in Thüringen eine Erfassung aller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Freistaat erschwert. Zum anderen gewähren leider nicht alle öffentlichen Förderprojekträger einen Einblick in ihre Projektdatenbanken.

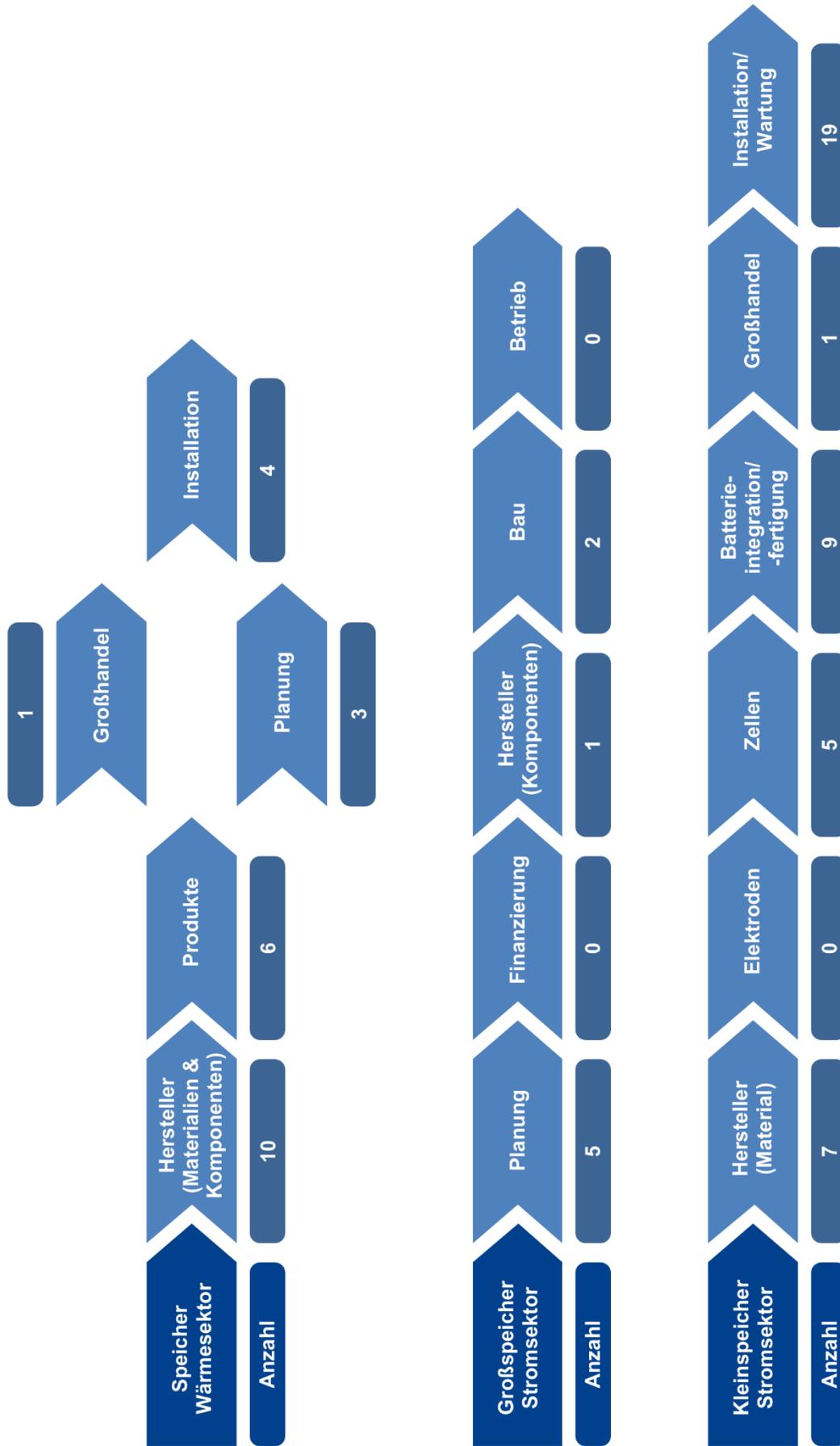
Abbildung 8.1 stellt die ermittelten Aktivitäten anzahlmäßig geordnet nach der Energieform, in der die eingespeicherte Energie im Speicher vorliegt, dar. Obwohl gemessen an der Anzahl der Akteure die Forschungsbeteiligung zunächst recht ausgewogen zu sein scheint, macht eine detaillierte Betrachtung (siehe Kapitel 3 und

Abbildung 8.1. Anzahl der Institutionen mit Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Energiespeicherbereich in Thüringen (aufgeschlüsselt nach Art des Speichers).

Quelle: Eigene Erhebung (FSU Jena)

4) deutlich, dass insbesondere auf Seite der Unternehmen in Thüringen wenige verschiedene Akteure existieren, die aktiv Forschung und Entwicklung an Energiespeichertechnologien betreiben. Zwar sind Unternehmen vereinzelt an Forschungs Kooperationen mit den Forschungsinstituten beteiligt oder haben sogar eigene Entwicklungsprojekte, jedoch findet der Großteil der Forschung und Entwicklung dennoch in den Hochschulen und freien Forschungsinstituten statt. Insbesondere gemessen an der Anzahl der Unternehmen, die in der Energiespeicherbranche tätig sind, ist der Anteil forschender und entwickelnder Unternehmen sehr gering. Als Ursache hierfür sind vorrangig die eher kleinen Unternehmensstrukturen und folglich das Fehlen von personellen und finanziellen Kapazitäten für die Forschung und Entwicklung zu sehen. Hierdurch ist in Thüringen keine flächendeckende Innovationstiefe in Bezug auf Energiespeichertechnologien gegeben. Vorhandene Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sind insbesondere im Bereich elektrochemischer Energiespeicher zu finden. Überhaupt hat sich innerhalb des

Abbildung 8.2. Wertschöpfungsketten im Strom- und Wärmesektor, sowie die Anzahl der in der entsprechenden Wertschöpfungsstufe tätigen thüringischen Unternehmen.



Quelle: Eigene Erhebung (EuPD Research)

Tabelle 8.3. Forschungseinrichtungen Thüringens, die Aktivitäten im Bereich der Energiespeicherung aufweisen.

Forschungseinrichtung	Speichertechnologie(n)
Center for Energy and Environmental Chemistry Jena (CEEC Jena)	Organische Batterien, Redox-Flow-Batterien, Natrium-Ionen-Batterien, Superkondensatoren, Hochtemperaturbatterien
Technische Universität Ilmenau	Lithium-Ionen-Akkus, ionische Flüssigkeiten für Energiespeicher
Hochschule Nordhausen	Energiespeicherung in gesamtheitlicher Betrachtung
Bauhaus-Universität Weimar	Salzhydratprozesse für Wärmespeicher
Institutsteil Angewandte Systemtechnik des Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung	Virtuelle Speicher
Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoffforschung	Phase-Change-Materials (PCM) für Latentwärmespeicher
Institut für angewandte Bauforschung Weimar	Wärmespeicher

Quellen: Eigene Erhebung (EuPD Research & FSU Jena)

Freistaates in den letzten Jahren vorrangig eine hohe Forschungsexpertise im Bereich der Stromspeicher gebildet. Dabei sind erste Firmengründungen zur Kommerzialisierung der im Land entwickelten, neuen Speichertechnologien sichtbar. Jedoch ist auch in diesem Bereich dennoch viel ungenutztes Potential zu verzeichnen. Bei thermischen Speichertechnologien sind relativ wenige Aktivitäten zu ermitteln und es fehlt in Thüringen insbesondere auch im Bereich der Materialentwicklung an entsprechenden Akteuren. Insgesamt spiegelt die Forschungsausrichtung auf Stromspeicher sowohl den allgemeinen Trend innerhalb Deutschlands sowie die Notwendigkeit zur Antwortfindung für eine Vielzahl offener Fragen bezüglich der effizienten Nutzung überschüssiger elektrischer Energie aus erneuerbaren Energien und

der Entwicklung von Stromspeichern für die Elektromobilität wider.

7.2.2 Wertschöpfungsketten und Branchenstrukturen

Im Rahmen dieser Studie wurden die Wertschöpfungsketten für den Strom- und Wärmesektor ganzheitlich betrachtet und eine Akteursrecherche zur Erfassung der Branchenstruktur im Freistaat durchgeführt. Für letzteres wurden Unternehmensstrukturen, Forschungsstrukturen und Netzwerkstrukturen ermittelt.

Abbildung 8.2 gibt zunächst einen zusammenfassenden Überblick über die wichtigsten Wertschöpfungsstufen im jeweiligen Sektor, sowie die Anzahl der in der entsprechenden Wertschöpfungsstufe tätigen thüringischen Unternehmen. Während der Recherche wurden insgesamt 38 Unternehmen im Stromsektor und 20 Unternehmen im Wärmesektor identifiziert.

Anhand der Zuordnung der Akteure zu den einzelnen Stufen ist zu erkennen, dass im Stromsektor die Unternehmen des Freistaates im Bereich der Großprojekte eher in der Planung und im Bereich der Kleinprojekte hauptsächlich im Bereich der Batterieintegration/-fertigung und der Installation/Wartung tätig sind. Im Wärmesektor ist das Haupttätigkeitsfeld die Material- und Komponentenherstellung. Die Aktivitäten in den übrigen Wertschöpfungsstufen sind relativ gleichverteilt. Insgesamt lässt sich auf beide Sektoren bezogen feststellen, dass die meisten Wertschöpfungsstufen in Thüringen wenigstens vereinzelt durch Unternehmen vertreten sind, jedoch nicht von einer geschlossenen Wertschöpfungskette die Rede sein kann. Zudem sind alle Thüringer Unternehmen im Energiespeicherbereich den kleinen und mittelständischen Unternehmen zuzuordnen. Demnach fehlt es auch an Großunternehmen bzw. bekannten Branchenführern. Wie zuvor zusammenfassend dargestellt, sind die personellen und finanziellen Möglichkeiten einer solchen „kleinteiligen“ Unternehmensstruktur begrenzt. Hierin lässt sich eine der Haupt-

ursachen für die geringen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten dieser Unternehmen sehen.

Die Forschungsstrukturen des Freistaates sind im Bereich der Energiespeicherung im Wesentlichen auf die Hochschulen und freie Forschungsinstitute konzentriert. Tabelle 8.3 fasst die Hauptakteure mit Zuordnung der erforschten Speichertechnologien zusammen. Daraus ist zu erkennen, dass die Forschungsaktivitäten hauptsächlich auf Stromspeicher ausgerichtet sind, sich aber die Forschungsaktivitäten zur Wärmespeicherung ebenfalls zunehmend durch die stärker bewusstwerdende Bedeutung des Wärmesektors für die Energiewende und den vielversprechenden Möglichkeiten der Sektorenkopplung etablieren.

Hinsichtlich der Netzwerkstrukturen wurden in Thüringen vier Hauptakteure im Bereich der Energiespeicherung ermittelt:

- Energie- und Umweltpark Thüringen e.V.,
- Netzwerk PolymerTherm,
- Thüringer erneuerbare Energien Netzwerk e.V. (ThEEN),
- Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur (ThEGA).

Grundsätzlich wurde – auch im Rahmen der Expertenworkshops – geschlussfolgert, dass die vorhandenen Netzwerkstrukturen ausreichend ausgebildet sind, jedoch deren Möglichkeiten von den Akteuren noch in zu geringem Maße genutzt werden. Gründe hierfür können ebenfalls die geringen personellen Kapazitäten zur konstanten Teilnahme an Netzwerkangeboten oder aber noch zu geringes Interesse an ebendiesen sein.

7.3 Geschäftsmodelle

Speichertechnologien stehen mit alternativen Optionen, wie z. B. dem Netzausbau, im Wettbewerb. Nur tragfähige und flexible Geschäftsmodelle mit Energiespeichern können dabei zukünftig am Energiemarkt bestehen. Diese sollten nicht ausschließlich die Lösung eines volkswirtschaftlichen Problems, wie z. B. die Energiewende, sondern vor allem den bezifferbaren Mehrwert für den einzelnen Kunden im Fokus haben.

Die Studie umreißt Geschäftsmodelle der Pumpspeicherkraftwerke, stationären Batteriespeicher – vom Heimspeicher über den Quartier- und Industriespeicher bis hin zum Backup-System für Kommunikationsanwendungen – sowie Power-to-X (P2X) – Technologien und beleuchtet aktuelle Marktsituationen, Potentiale sowie Herausforderungen der verschiedenen Geschäftsmodelle. Darüber hinaus wird ein Ansatz zur Auswahl eines geeigneten stationären Speichersystems vorgestellt, der mehr als die reinen Investitionskosten berücksichtigt. Um effektiv verschiedene technologische Batteriesysteme miteinander vergleichen zu können, nutzt der Ansatz die Annuitätenmethode. In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2067 können so Speichersysteme verschiedener Technologien mittels Speicherkostenberechnung vergleichbar gemacht werden. Dafür steht ein Excel-Tool zum Download auf der Internetseite des CEEC Jena zur Verfügung.²⁸⁴

7.4 Brancheneinschätzung aus Expertensicht

Für die Einschätzung der Branche wurden 17 leitfadengestützte Experteninterviews mit Experten aus den Bereichen Banken und Versicherungen, Bildungs- und Forschungseinrichtungen, Bundesverbänden sowie Unternehmen durchgeführt. Dabei wurden insbesondere die Standortvorteile und -nachteile, die Wettbewerbssituation, die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, die

²⁸⁴ Download der Datei unter: <https://www.ceec.uni-jena.de/Downloads.html> (es wird ein Passwort benötigt: CEEC_batterie14).

Geschäftsmodelle und die Entwicklungstendenzen aus Sicht der Experten abgefragt.

Während sowohl die Lage und Verkehrsanbindung als auch die Forschungslandschaft als Hauptvorteile des Standortes Thüringens gesehen wurden, spiegelten sich die Ergebnisse der Ist-Analyse hinsichtlich der kleinteiligen Unternehmensstruktur und der mangelnden Produktion auch in den Anmerkungen der Experten zu den Standortnachteilen wieder. Insbesondere aus diesen Nachteilen resultierte auch die Einschätzung einer insgesamt geringen Wettbewerbsintensität. Dementsprechend wird Thüringen – wie Deutschland insgesamt – eher als Forschungsstandort wahrgenommen. Nach Einschätzung der befragten Experten profitieren die thüringischen Branchenakteure von der Forschungslandschaft, wodurch statistisch jede zweite Kooperation von den Experten mit Unternehmen und Forschungsinstituten innerhalb Thüringens eingegangen wird.

Potentiale für neue Geschäftsmodelle in der Energiespeicherbranche sehen die Experten vor allem in der Weiterentwicklung der Regelenergiemärkte, der Energieautarkie, Speichervermietung, Bereitstellung von Systemdienstleistungen, virtuellen Speicherkraftwerken und der E-Mobilität. Hierbei heben die Experten insbesondere die ungenutzten Möglichkeiten der Wasserstofftechnologien für den Verkehrssektor hervor.

Insgesamt herrschte in den Interviews hinsichtlich der Entwicklungstendenzen Einigkeit darüber, dass die Energiespeicherung künftig weiter an Bedeutung zunehmen wird. In Bezug auf konkrete Technologien wurde von den Interviewpartnern mehrheitlich das Speichermedium Wasserstoff als eines der zukunftsweisenden Speichermedien gesehen. Unabhängig vom Speichermedium wird der Verkehrssektor für die Speicherbranche einen treibenden Entwicklungsfaktor darstellen. Für den Wandel hin zu einer dezentralen Energieversorgung sehen die Experten Energiespeicher als eine der wichtigsten Flexibilitätsoptionen. Jedoch besteht akuter Bedarf

die Entwicklung neuer Speichertechnologien schnellstmöglich zu einer technologischen Reife für die praktische Anwendung zu bringen. Hierfür müssen insbesondere wettbewerbsfähige Kosten erreicht werden. Die Kostensenkung für Speichertechnologien, deren grundsätzliche Realisierbarkeit bereits nachgewiesen wurde, stellt aus Expertensicht somit eine der vorrangigen Entwicklungstendenzen dar.

Anhang

Anhang A.1. Interviewleitfäden für die Experteninterviews.

Halbstandardisierter Interviewleitfaden (für Akteure der Forschungs- und Entwicklungsbranche)	
Frage 1	Mit welchen Unternehmen/Zulieferern aus Thüringen und von außerhalb arbeiten Sie zusammen und wie sind die Anteile (schätzen)? Wie sind Sie über die Wertschöpfungskette miteinander verbunden? Welche Unternehmensbereiche fehlen in Thüringen bzw. sollten ausgebaut werden?
Frage 2	Mit welchen thüringischen, nationalen und internationalen Unternehmen und Forschungseinrichtungen kooperieren Sie?
Frage 3	Welche F&E-Aktivitäten bestehen bei Ihnen und welche Entwicklungen sind in den nächsten 3-4 Jahren geplant?
Frage 4	Welche signifikanten Standortvorteile bestehen aus Ihrer Sicht in Thüringen? Welche Hemmnisse müssen überwunden werden? Wie kann der Freistaat Sie dabei unterstützen?
Frage 5	Wie ist die nationale und internationale Wettbewerbssituation? Welche Probleme/Chancen ergeben sich daraus für Sie? Wie kann der Freistaat Sie hier unterstützen?
Frage 6	Ermöglichen die derzeitigen legislativen Rahmenbedingungen die Etablierung von Geschäftsmodelle? Welcher? Welche gesetzlichen Änderungen bzw. Weiterentwicklungen sind notwendig?
Frage 7	Welche Investitionen und Infrastrukturen sind notwendig, um die Wettbewerbsfähigkeit der Thüringer Energiespeicherbranche zu erhalten / zu steigern? Wie kann der Freistaat dies unterstützen?
Frage 8	Welche generellen Entwicklungstendenzen in der Energiespeicherbranche sehen Sie als zukunftsweisend an?
Halbstandardisierter Interviewleitfaden (für Akteure der Finanzbranche)	
Frage 1	Welche Energiespeicheraktivitäten (F&E, Produktion, ...) finden Sie interessant und warum? Welche Entwicklungen erwarten Sie in den nächsten 3-4 Jahren?
Frage 2	Welche generellen Entwicklungstendenzen der Energiespeicherbranche sehen Sie als zukunftsweisend an?
Frage 3	Welche signifikanten Standortvorteile bestehen aus Ihrer Sicht in Thüringen? Welche Hemmnisse müssen überwunden werden? Wie kann der Freistaat dies unterstützen?
Frage 4	Welche Geschäftsmodelle sind für Sie als Finanzierungsunternehmen interessant? Warum setzen Sie auf diese Modelle?
Frage 5	Welche Finanzierungsmodelle bestehen für Forschungsvorhaben, Projektentwicklung, Demonstrationsvorhaben und Anwendungen in der Energiespeicherbranche? Wie werden diese genutzt? Welche Potenziale sind hier vorhanden und wie können diese gehoben werden?
Frage 6	Welche Investitionen und Infrastrukturen sind notwendig, um die Wettbewerbsfähigkeit der Thüringer Energiespeicherbranche zu erhalten / zu steigern? Wie kann der Freistaat dies unterstützen?

Quelle: Leitfaden im Rahmen dieser Studie entwickelt (ThEEN)

Anhang A.2. Teilnehmer der Experteninterviews.

Institution des Experten	Tätigkeitsbereich
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern)	Unternehmen
EAS Germany GmbH	Unternehmen
H.M. Heizkörper GmbH & Co. KG	Unternehmen
IMG Electronic & Power Systems GmbH	Unternehmen
JENA GEOS - Ingenieurbüro GmbH / IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH	Unternehmen
Kumatec GmbH	Unternehmen
maxx-solar & energie GmbH & Co. KG	Unternehmen
Sinusstrom GmbH	Unternehmen
Smartpolymer GmbH/Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (TITK)	Unternehmen
Stadtwerke Energie Jena-Pößneck	Unternehmen
SWE Stadtwerke Erfurt GmbH	Unternehmen
TÜV Thüringen e.V.	Unternehmen
WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG	Unternehmen
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) Institutsteil Angewandte Systemtechnik (AST)	Forschung und Entwicklung
Hochschule Nordhausen	Forschung und Entwicklung
Bundesverband Energiespeicher e.V (BVES)	Bundesverband
Deutsche Kreditbank AG (DKB)	Bank / Versicherung

Quellen: Eigene Erhebung (ThEEN)

Anhang A.3. Teilnehmer der beiden im Rahmen dieser Studie durchgeführten Expertenworkshops

Institution der Experten	Tätigkeitsbereich	1. Workshop (Anzahl Teilnehmer)	2. Workshop (Anzahl Teilnehmer)
ThEEN e.V.	Unternehmen	3	2
IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH	Unternehmen	0	1
TÜV Thüringen e.V.	Unternehmen	0	1
UST Umweltsensortechnik GmbH	Unternehmen	1	1
va-Q-tec AG	Unternehmen	1	1
Chemiewerk Bad Köstritz GmbH	Unternehmen	0	1
JENA GEOS – Ingenieurbüro GmbH	Unternehmen	0	1
Center for Energy and Environmental Chemistry Jena (CEEC Jena) von der Friedrich-Schiller-Universität (FSU) Jena	Forschung und Entwicklung	3	3
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)	Forschung und Entwicklung	2	1
Fachverband Biogas e.V.	Fachverband	1	0
Thüringer Aufbaubank	Bank / Versicherung	1	1
		<u>Σ 12</u>	<u>Σ 13</u>

Quelle: Eigene Erhebung (ThEEN)

