

Resilienz durch Energiespeicher



ZAE

Anna Kümmer
anna.kuemmer@zae-bayern.de

DBFZ

Tino Barchmann
tino.barchmann@dbfz.de

Karin Naumann
karin.naumann@dbfz.de

DLR

Dr. Martin Henke
martin.henke@dlr.de

Prof. Dr. Annelies Vandersickel
annelies.vandersickel@dlr.de

Dr. Stefan Zunft
stefan.zunft@dlr.de

Fraunhofer IEG

Dr. Peter Achtziger-Zupaničič
peter.achtziger-zupanicic@ieg.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE

Dr. Peter Nitz
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

Dr. Thomas Fluri
thomas.fluri@ise.fraunhofer.de

Oliver Fitz
oliver.fitz@ise.fraunhofer.de

Lea Eisele
lea.eisele@ise.fraunhofer.de

KIT

Prof. Dr. Eva Schill
eva.schill@kit.edu

Energiespeicher im Kontext eines resilienten Energiesystems

Das Ziel der Bundesregierung, bis 2050 die Stromversorgung nach Möglichkeit ausschließlich auf Basis erneuerbarer Energiequellen bereitzustellen, bringt große Herausforderungen im Hinblick auf die Integration fluktuierender Energiequellen mit sich [1].

Gleichzeitig bedingen verschiedene Faktoren steigende Anforderungen an die Versorgungssicherheit und Betriebssicherheit von Energiesystemen. Dazu gehören zunehmende Digitalisierung, höherer Technologisierungsgrad, die begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen oder auch politische Rahmenbedingungen.

„Resilienz“ (Widerstandsfähigkeit) wird in einem Energiesystem relevant, wenn es äußeren oder inneren Einflüssen ausgesetzt ist, die sich sowohl auf Seite der Energiebereitstellung als auch auf Seite des Energiebedarfs auswirken können. Entsprechend entstehende Schwankungen auf beiden Seiten können mittels Energiespeichern ausgeglichen oder gemindert werden, da diese Energie zeitlich und räumlich flexibel aufnehmen und abgeben können (► Abbildung 1).

Zentrale Ziele einer resilienten Energieversorgung sind dabei die Versorgungs- und Betriebssicherheit bei gleichzeitiger fortlaufender Integration erneuerbarer Energien.

Energiespeichertechnologien können je nach gespeicherter Energieform in drei Klassen unterschieden werden (► Abbildung 2):

Elektrische Speicher

speichern Energie

- elektro-statisch in Kondensatoren,
- elektro-magnetisch durch supraleitende-magnetische Energiespeicher (SMES),
- elektro-chemisch mittels Batterien,
- mechanisch (z. B. in Form von Schwungrad speichern oder Pumpspeicherkraftwerken).

Chemische Speicher

auch stoffliche Speicher genannt, speichern Energie

durch Umwandlung von elektrischer Energie in chemische Energie in Form von

- synthetischem Wasserstoff,
- Methan, Ammoniak oder
- synthetischen Kraftstoffen.

Je nach Endprodukt wird so die Speicherung und der Transport im Gasnetz, in Tanklagern oder Schiffen ermöglicht.

Thermische Speicher

speichern Energie in Form von

- fühlbarer Wärme (sensible Speicher mit flüssigem oder festem Speichermedium),
- latenter Wärme (PCM-Speicher („Phase Change Materials“) mit Phasenübergang fest-flüssig oder fest-fest) oder
- thermo-chemischer Energie (der Reaktionsenthalpie von chemischen Reaktionen oder von Ad-/Absorptionsreaktionen).

Beiträge von Energiespeichern für eine resiliente Energieversorgung

Energiespeicher können in vielerlei Hinsicht zu einer resilienten Energieversorgung beitragen:

Redundanz

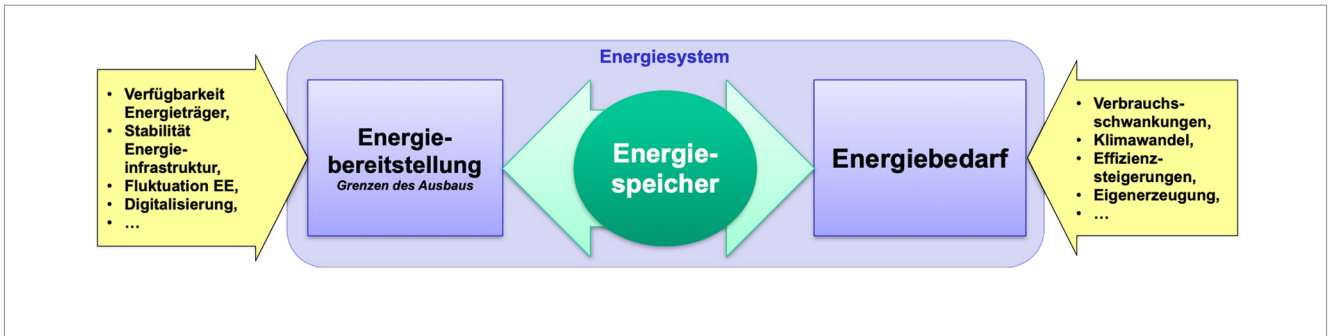
ist unter anderem erforderlich, um die Versorgungs- und Betriebssicherheit sicherzustellen. Energiespeicher aller Art können zusätzliche Kapazitäten bereithalten, die im Falle eines Versorgungsengpasses abgerufen werden können.

Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)

von energiesensiblen Einrichtungen können elektrische Speicher sicherstellen, so dass kritische Verbraucher kontrolliert abgeschaltet werden können oder eine Notstromversorgung gestartet werden kann.

Schwarzstartfähigkeit

ist erforderlich, wenn das Stromnetz ausgefallen ist. Elektrische Energiespeicher und Pumpspeicherkraftwerke können ein (Teil-)Netz ohne externe Versor-



gung anfahren und für eine gewisse Zeit die netzgebundene Versorgung ersetzen.

Stabilität und Regelung des Stromnetzes
 können insbesondere elektrische Speicher, aber in Kombination mit Power-to-X auch thermische und chemische Speicher unterstützen, z. B. beim Netzengpassmanagement (Redispatch), Frequenzregelung oder Spannungshaltung. Weiterhin können Energiespeicher zum schnellen Ausregeln von Residuallastgradienten in Folge der Einspeisung fluktuierender erneuerbarer Energien eingesetzt werden und so das Stromnetz entlasten. [2]

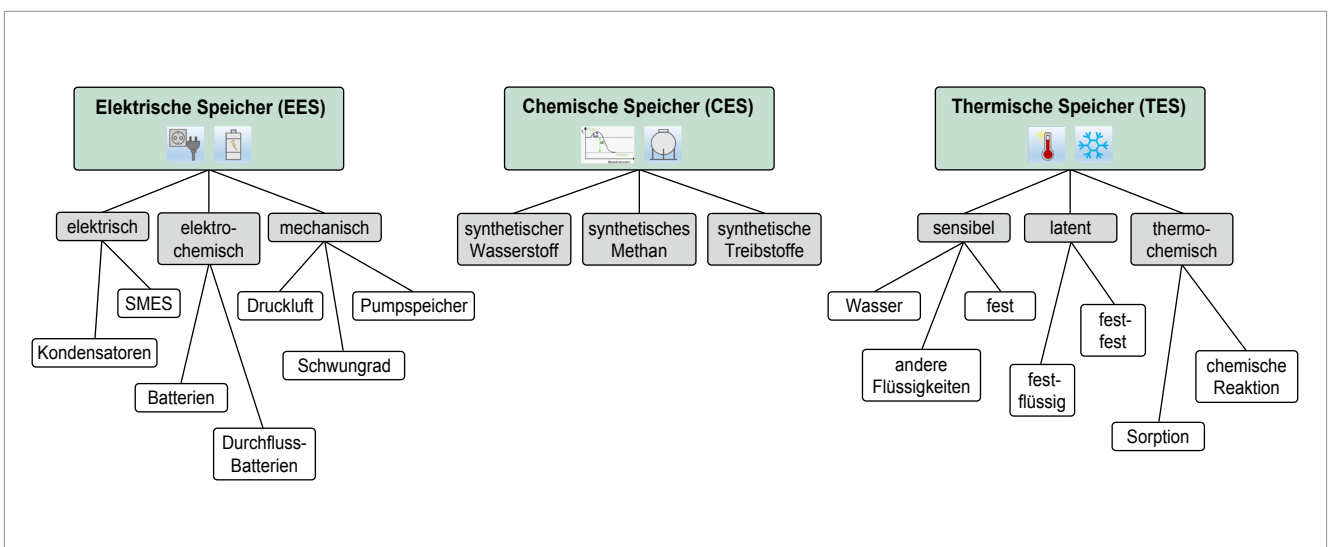
Dezentrale Lösungen
 bei der Netzgestaltung, die die Ausbreitung von Störungen reduzieren, werden durch Energiespeicher unterstützt, ebenso die *Integration der Anwenderseite*, durch gezieltes Lastmanagement, Peak-Shaving oder durch die Einbindung und höhere Ausnutzung von Eigenerzeugungsanlagen. Dafür können Energiespeicher aller Klassen eingesetzt werden.

Erneuerbare Energien
 werden die Basis der zukünftigen Energieversorgung sein. Ihr fluktuierendes Angebot kann durch Lastverschiebung nicht vollständig an den Bedarf angepasst werden (Dunkel-Flaute). Eine resiliente Energieversorgung erfordert daher erhebliche Energiespeicherkapazitäten sowie die flexible Kopplung der Verbrauchssektoren Strom, Wärme und Mobilität.

Im Jahr 2021 setzte sich der Endenergiebedarf in Deutschland zu 58,9% aus thermischer Energie und zu 35,9% aus mechanischer Energie zusammen; bei letzterer betrug der Verkehrsanteil rd. 76% [3]. Prognosen legen nahe, dass die Wärme- und Mobilitätssektoren in Summe auch in Zukunft einen Großteil des Energiebedarfs von über 70% ausmachen werden (siehe z. B. [4], [5]). Preiswerte thermische Speicher können daher voraussichtlich einen bedeutenden Anteil der erforderlichen Speicherkapazität übernehmen. Erneuerbare Energien werden zu einem großen Teil als Strom aus Sonne und Wind geliefert [6]. Die effiziente Verteilung, Speicherung und Nutzbarmachung des erneuerbaren Stroms im Wärme- und

► *Abbildung 1*
Rolle von Energiespeichern
 im Kontext einer resilienten Energieversorgung
 (Quelle: ZAE)

► *Abbildung 2*
Übersicht Energiespeichertechnologien
 Einteilung nach gespeicherter Energieform.
 (Quelle: ZAE)



Mobilitätssektor ist daher von entscheidender Bedeutung.

Im Rahmen einer internationalen Forschungs-kooperation der International Energy Agency (IEA) wurde in einem Task zur flexiblen Sektorenkopplung durch Energiespeicher (Task 35 „seccoflex“) unter Leitung des ZAE Bayern über Definition, Nutzen und Anwendungsmöglichkeiten flexibler Sektorenkopplung durch Energiespeicher diskutiert. Definiert man Sektoren als Verbrauchssektoren (Strom, Wärme, Mobilität), so ist über die Integration verschiedener Energiespeichertechnologien (thermisch, elektrisch und chemisch) die bedarfsgerechte Versorgung eines jeden Verbrauchssektors möglich, was die zeitliche und räumliche Flexibilität des Gesamtsystems erhöht.

Ausgehend vom Stromsektor als zentraler Einspeisequelle erneuerbarer Energien ergeben sich fünf Pfade für mögliche Sektorenkopplung wie ► Abbildung 3 zeigt:

- Strom ► Wärme:
 1. Power-to-Heat
 2. Power-to-Gas
 3. PV + Batterie für Wärmebereitstellung
- Strom ► Mobilität:
 4. Power-to-Gas/Fuel
 5. E-Mobility

Der vorläufige Stand der Auswertungen zu einer Vielzahl von Fallbeispielen auf lokaler und nationaler Ebene innerhalb des Tasks ergibt, dass durch die flexible Sektorenkopplung mit Energiespeichern in nahezu allen Fällen der Anteil erneuerbarer Energien erhöht und die Ökonomie der Gesamtsystemkosten verbessert wird.

Systemansätze und Projektbeispiele mit Energiespeichern zur Steigerung der Resilienz

Elektrische Speicher

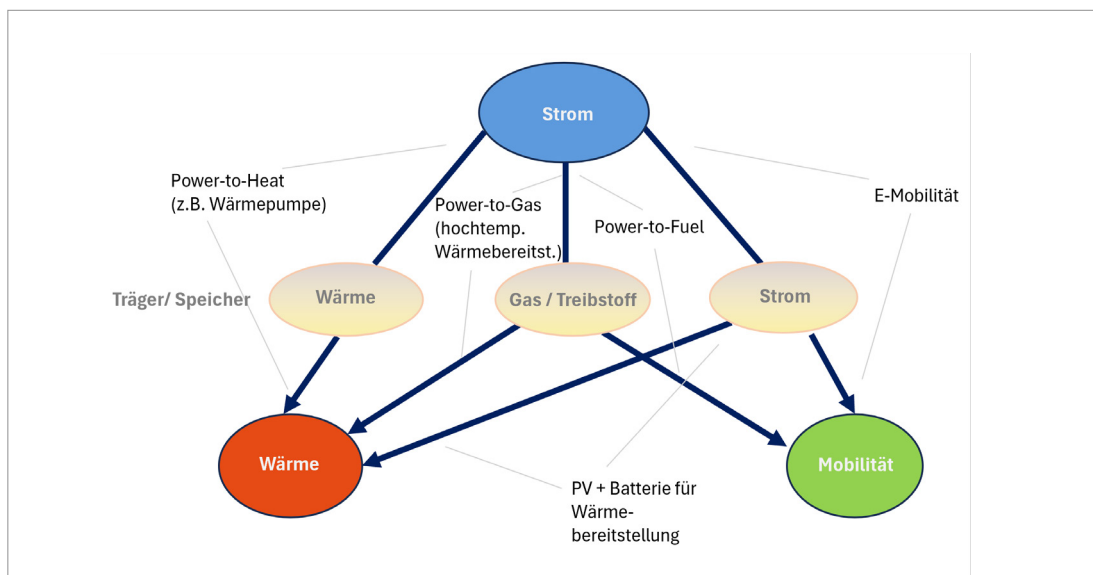
Für elektrische Speicher untersucht das Fraunhofer IEG im Projekt UPSP mit seinen Partnern, wie die Integration von Pumpspeicherwerken im Altbergbau die Bereitstellung zusätzlicher Speicherkapazitäten vor allem für Solar- und Windenergie ermöglichen kann. Der Speicher bietet dabei alle Vorteile und Nutzungsmöglichkeiten eines obertägigen Pumpspeicherkraftwerks (z. B. Netzstabilisierung, Bereitstellung hoher Backup-Kapazitäten und variabler Lastzyklen). Außerdem erfordert der Speicher nur geringen zusätzlichen Platz und geringe Zusatzkosten (aufgrund hoher Gefälle zwischen bestehenden Hohlräume und zumeist vorhandener Anbindung ans Stromnetz). Weiterhin besteht ein Resilienzbeitrag in der Dezentralisierung der Speicherinfrastruktur, welche allerdings meist auf die deutschen Mittelgebirge beschränkt ist.

Insbesondere bei elektro-chemischen Speichern ist die Verfügbarkeit von Rohstoffen ein zentrales Thema, welches die Zukunftsfähigkeit verschiedener Technologien mitentscheidet. In zwei Projekten mit Beteiligung des Fraunhofer ISE wird an Alternativen zu Lithium-Ionen-Batterien geforscht. Im Projekt INFAB (FKZ 03EI3040C) wird an Zink-Ionen-Batterien für die stationäre Energiespeicherung geforscht, welche als Heimspeicher z. B. in Kombination mit PV die Autarkie erhöhen, als Industriespeicher die Anschlussleistung/Netzbelastung reduzieren oder theoretisch als Großspeicher auch zur Netzpufferung eingesetzt werden können. Im Projekt PRONTO (FKZ WM34-42-57/19) wird an der Produktion von

► Abbildung 3

Konzept der flexiblen Sektorenkopplung:
mögliche Pfade zur Kopplung von Verbrauchssektoren mittels Energiespeichern

(Quelle: ZAE)



Natrium-Ionen-Batterien gearbeitet, die zukünftig ebenfalls als Heim- oder Industriespeicher zur Netzpufferung genutzt werden könnten oder auch für mobile Anwendungen im Stromnetz denkbar sind.

Thermische Speicher

Bei thermischen Speichern zeigt das Fraunhofer ISE im Projekt LuftBlock (FKZ 03EN403A-C) mit verschiedenen Partnern, wie ein Hochtemperaturwärmespeicher, der potenziell auch elektrisch beheizbar ist, mit innovativer Füllkörpertechnologie und Luft als Wärmeträger in der Keramikindustrie zur Abwärmenutzung eingesetzt werden kann. Die Forschungsaktivitäten umfassen dabei die Weiterentwicklung der Speichertechnologie, Untersuchung der thermo-mechanischen Stabilität und der Demonstration bei hohen Temperaturen bis 900 °C. Durch den Speicher als Back-up-Wärmequelle wird zum einen die Redundanz erhöht, zum anderen ist flexible Sektorenkopplung in Form von Power-to-Heat möglich.

Weitere Beiträge zur Resilienz sind, dass durch die Eigenerzeugung die dezentrale Energiebereitstellung gefördert und die Ressourcenabhängigkeit durch ein lokal verfügbares Speichermaterial reduziert wird.

Anhand der Integration eines Hochtemperatur-speichers in ein brennstoffflexibles Mikrogas-turbinen-BHKW liefert das DLR einen Ansatz, wie eine bedarfsgerechte Strom- und Wärmeerzeugung mittels verschiedener Energiequellen (Strom, gespeicherte Wärme, Erdgas, H₂ etc.) die Flexibilität und Effizienz des Gesamtsystems erhöhen kann. Bei dem Speicher handelt es sich um einen elektrisch beheizbaren Wärmespeicher aus Keramikwaben, der Temperaturen bis ca. 1000 °C erreicht. Die gespeicherte Wärme kann entweder die benötigte Brennstoffmenge reduzieren oder diese gänzlich ersetzen. Beispielsweise kann so mit einer Speicher-Kerngröße von ca. 30 m³ bis 57 m³ ohne zusätzlichen Brennstoffeinsatz für ca. 15 Stunden eine elektrische Leistung von 100 kW_{el} und eine thermische Leistung von 167 kW_{th} bereitgestellt werden. Im Jahr 2025 ist eine experimentelle Erprobung mit virtueller Kopplung geplant. [7]

Im Projekt Bio2Geo (FKZ 03ET1593A-F) entwickelte das DBFZ mit Partnern ein integratives Hybridkraftwerk für die Kopplung von Bioenergie und Geothermie für verschiedene Abnehmerstrukturen. Bei dem Wärmespeicher handelt es sich um ein Erdwärmesondenfeld, in das die Überschusswärme einer bestehenden Biogasanlage saisonal eingespeichert werden kann. Der Speicher hat einen Durchmesser von ca. 22 m und besteht aus 30 Sonden à 30 m. Als Versorgungsoption sind

sowohl die Direktabnahme als auch die Einspeisung in ein Nah- und Fernwärmenetz (z. B. mithilfe einer Wärmepumpe) möglich. Beiträge zur Systemresilienz werden hier durch eine hohe Anpassungs- und Reaktionsfähigkeit auf saisonale Wärmebedarfe, gute Skalierbarkeit, sehr lange Lebensdauer (über 50 Jahre) und flexible Betriebsweise (Betrieb auch ohne Überschusswärme einer BGA möglich) erreicht. Weiterhin kann durch die Zusatzoption „passives Kühlen“ im Sommer die Vielseitigkeit und Wirtschaftlichkeit erhöht werden.

Alternativ zu „klassischen“ sensiblen Wärmespeichertechnologien mit Wasser forscht das KIT in dem Projekt Geoenergiecampus an der Speicherung von Wärme im tiefen Untergrund am KIT Campus Nord. Untersucht wird hier die Kopplung einer Wärmeversorgung aus Tiefengeothermie mit einem Hochtemperatur-Aquiferspeicher in den wasserführenden Randbereichen eines nicht mehr genutzten Erdölfeldes zur verlustfreien, dezentralen Versorgung. Die Kapazitätserhöhung durch den Speicher betrage 33,6 GWh bei einer Leistungserhöhung von 10-11 MW. Durch die Integration des Speichers könnte der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung von 25 auf über 65 % gesteigert werden.

Chemische Speicher

Ein Beispiel zur chemischen Speicherung zeigt das DBFZ in dem Projekt Pilot-SBG, bei dem Bioressourcen und Wasserstoff zu Methan als Kraftstoff verarbeitet werden. Hierfür wurde in Leipzig eine Pilotanlage zur Demonstration eines integrativen Konzeptes, von den erneuerbaren Ressourcen bis hin zum Methan, in Kraftstoffqualität entwickelt (► Abbildung 4). Sie soll die Skalierung des Gesamtkonzeptes in bis zum kommerziellen Maßstab unterstützen.

In der Pilotanlage erfolgt eine katalytische Methanisierung von Biogas aus biogenen Rest- und Abfallstoffen (20 kg/d) mit Wasserstoff (7,3 m³/d) zu Methan (2,5 m³/d). Der Resilienz-Beitrag besteht hier vor allem in der Bereitstellung eines alternativen, auch aus fluktuierenden erneuerbaren Energien gewonnenen speicher- und transportfähigen Kraftstoffs sowie einem optimierten „Demand Side Management“ zur Steigerung der Energieeffizienz sowie Reduktion und Flexibilisierung des prozessbedingten Wärme- und Strombedarfs.

► Abbildung 4

**Projekt Pilot-SBG:
Herstellung von
Methan als Kraftstoff
aus Bioressourcen und
Wasserstoff**

 Ansicht vom Aufbau der
Pilotanlage 03/2023

(Quelle: DBFZ)



Herausforderungen, Hemmnisse und Forschungsbedarf bei der Integration von Energiespeichern

Die Integration von Energiespeichern in Energieversorgungssysteme steht vor einigen Herausforderungen und Hemmnissen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im Folgenden einige mögliche Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsaktivitäten dargestellt.

Juristische und politische bzw. regulatorische Hemmnisse

liegen z. B. in der Abgaben- und Umlagensystematik, die auch in aktuellen Gesetzentwürfen noch nicht geregelt ist [8]. Weiterhin fehlen Anreize für einen netzdienlichen Betrieb von Energiespeichern, z. B. in Form von flexiblen Stromtarifen.

Technische Hemmnisse

ergeben sich z. B. durch komplexe regelungstechnische Einbindung bei der Systemintegration oder durch unzureichende Standardisierung von Schnittstellen. Eine aussagekräftige Bewertung oder ein Vergleich konkurrierender Technologien wird oftmals behindert, weil detaillierte Speicherkenn- daten (z. B. Kosten oder Wirkungsgrade) nur eingeschränkt verfügbar sind. Mitunter besteht noch Entwicklungsbedarf sowohl bei Speichertechnologien als auch bei Produktionsprozessen. Weiterhin können technische Anforderungen, wie z. B. die neue Batteriespeicherverordnung, welche sich auf die Batteriefertigung auswirkt, ein limitierender Faktor sein.

Ökologische Hemmnisse

bestehen in der Herkunft, Verfügbarkeit, Sicherheit und nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen zur

Speicherherstellung. Vor allem für elektrische Energiespeicher sind die sehr begrenzt verfügbare Materialien wie z. B. Lithium oder Kobalt limitierend. Bei thermischen Energiespeichern ist beispielsweise die Paraffin-Gewinnung als Nebenprodukt der Erdölproduktion als Phasenwechselmaterial problematisch.

Ökonomische Hemmnisse

liegen u. a. darin, dass der Wert einer resilienten Energieversorgung in der Regel nicht beziffert wird und auch nicht leicht bezifferbar ist, während die Kosten für eine erhöhte System-Sicherheit und Flexibilität in die Bewertung der Wirtschaftlichkeit eingehen. Eine Systemintegration von Energiespeichern erfordert weiterhin u. U. die Zusammenführung unterschiedlichster Stakeholder, die in unterschiedlichen Amortisationszeiten denken. Besonders komplex wird die ökonomische Bewertung, wenn Energiespeicher mehr als nur einen Nutzen bereitstellen („Revenue Stacking“), und wenn daran verschiedene Stakeholder interessiert sind.

Fazit

Energiespeicher können Energie bedarfsgerecht ein- und ausspeichern und dadurch einen entscheidenden Beitrag zur Systemresilienz leisten. Verschiedene Speichertechnologien für sämtliche Energieformen und Anwendungsfälle sind verfügbar. Energiespeicher haben insbesondere hinsichtlich der Integration erneuerbarer Energien eine zentrale Rolle für die flexible Sektorenkopplung. Für nachhaltige resiliente Lösungen ist allerdings auch die Ressourceneffizienz und -verfügbarkeit der Speichertechnologien entscheidend. Für eine

schnellere Verbreitung und Systemintegration müssen regulatorische, technische und ökonomische Hürden abgebaut werden. Forschungsbedarf besteht z. B. hinsichtlich ressourceneffizienter Speichertechnologien oder Methoden und Ansätzen zur vergleichenden Bewertung verschiedener Speichertechnologien.

Referenzen

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016), „Klimaschutzplan 2050 Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“ [Online].
Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.pdf>
- [2] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2016), „Bereitstellung von (System-) Dienstleistungen im Stromversorgungssystem: Beitrag von Energiespeichern“ [Online].
Available: https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20160725_SDL-Energiespeicher.pdf
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023), „Energieeffizienz in Zahlen“ [Online].
Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2022.pdf>
- [4] Forschungsstelle für Energiewirtschaft (2009), „Energiezukunft 2050“ [Online].
Available: <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/energiezukunft-2050/>
- [5] H.-M. Henning, A. Palzer, „Energiesystem Deutschland 2050“ [Online].
Available: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE_Energiesystem-Deutschland-2050.pdf
- [6] P. Sterchele, J. Brandes, J. Heilig, D. Wrede, C. Kost, T. Schlegl, A. Bett, H.-M. Henning (2020), „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem“ [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf>
- [7] E. Agelidou, H. Seliger-Ost, M. Henke, V. Dreißigacker, T. Krummrein, P. Kutne (2022), „The Heat-Storing Micro Gas Turbine—Process Analysis and Experimental Investigation of Effects on Combustion“, *Energies* 2022, 15, 6289. Available: <https://doi.org/10.3390/en15176289>
- [8] BVES Bundesverband für Energiespeicher Systeme e.V. (2023), „Von der Speicherdefinition zur Speicherstrategie“ [Online].
Available: https://www.bves.de/wp-content/uploads/2023/07/BVES_Speicherstrategie_20230620.pdf